

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

“ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності _____ 153 Мікро - та наносистемна техніка _____
(код і назва)

на тему: Резонансний інвертор для живлення індукційної печі.

Виконав (-ла): студент (-ка) II курсу, групи ДП-91мп
(шифр групи)

_____ **Скоропляс Вадим Леонідович** _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник: доц. каф. МЕ, к.т.н., доц.

_____ **Мачулянський Олександр Вікторович** _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., к.ф.-м.н., с.н.с., Свєчніков Г. С.

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Консультант з інформаційних питань

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут (факультет) _____ **Факультет електроніки** _____
(повна назва)

Кафедра _____ **Кафедра мікроелектроніки** _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність _____ **153 Мікро- та наносистемна техніка,** _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) (ініціали, прізвище)
« ____ » _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Скоропляс Вадим Леонідович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Резонансний інвертор для живлення індукційної печі,
науковий керівник дисертації доц. каф. МЕ, к.т.н., доц. Мачулянський О.В. _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження прилад індукційного розігріву металів та металоксидів до надвисоких температур.

4. Предмет дослідження розробка алгоритму безпечного входу в робочий режим резонансного інвертора для живлення індукційної печі, використання мікросхеми для оптимального контролю потужності індуктора.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

1. Аналіз видів індукційної печі.
2. Розробка алгоритму безпечного входу в робочий режим резонансного інвертора для живлення індукційної печі.
3. Вибір типу генератора для живлення індукційної печі.
4. Регулювання частотою генератора на основі операційних підсилювачів.

5. Проектування принципової схеми.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу _____

7. Консультанти розділів дисертації*

8. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз видів індукційної печі.	02.09.2020 – 13.09.2020	
2	Розробка алгоритму безпечного входу в робочий режим резонансного інвертора для живлення індукційної печі.	14.09.2020 – 04.10.2020	
3	Вибір типу генератора для живлення індукційної печі.	05.10.2020 – 25.10.2020	
4	Регулювання частотою генератора на основі операційних підсилювачів.	26.10.2020 – 04.11.2020	
5	Проектування принципової схеми	05.11.2020 – 21.11.2020	
6	Оформлення магістерської дисертації	21.11.2020 – 04.12.2020	

Студент

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

ABSTRACT

The master's thesis "Resonant inverter for power induction furnace" is 86 pages, contains 12 tables, 16 illustrations, 19 information sources are used.

The urgency of the work is that induction heating is an innovative modern method of metal processing, and the resulting heating of various types of surfaces and materials for the needs of a large number of industries. The technology is easy to implement, as induction heating only requires high-frequency alternating current power supply.

The main reason for the active use of induction heating in industry is the quantitative benefits of technology. Several basic, economy of production resources, purity in melting, tightness of heating chambers, safety, detailed control of temperatures, concerning analogs efficiency is higher, speed of working processes, automation.

The object of study is a device for induction heating of metals to ultra-high temperatures.

The subject of work is the development of a fast-response algorithm of input and optimal control of the chip, operating mode, frequency and power on the inverter, to power the operation of the induction furnace within the resonance.

The aim of the work is to develop a method for optimal control of the frequency of the generator that supplies induction heating, we analyze the feedback from the inductor that returns the actual power in the circuit to check the allowable safe power of the system. Automatic frequency control to reduce the heating power, prevents the components of the device from malfunctioning, and prevents overheating of the furnace inductor during long operation at frequencies near the resonant.

Keywords: INDUCTION HEATING, RESONANCE INVERTER, RESONANCE, INTEGRATED CIRCUIT.

РЕФЕРАТ

Магістерська робота «Резонансний інвертор для живлення індукційної печі» за об'ємом складає 86 сторінки, містить 12 таблиці, 16 ілюстрації, використано 19 інформаційних джерел.

Актуальність роботи у індукційному нагріванні як іноваційному сучасному методу обробки металів, та результуючого нагрівання різних видів поверхностей і матеріалів для потреб у великій кількості галузь. Технологія легко впроваджується, так як для індукційного нагріву лише необхідне живлення зміним струмом високої частоти.

Головна причина активного застосування індукційного нагрівання в промисловості це кількісні переваги, які надає технологія. Декілька основних, економія виробничих ресурсів, чистота у плавленні, герметичність камер розігріву, безпека, детальний контроль температурами, відносно аналогів ККД вищий, швидкість робочих процесів, автоматизація.

Об'єктом дослідження вибраний пристрій індукційного нагрівання металів до надвисоких температур.

Предмет роботи – розробка швидко реагуючого алгоритму входу та оптимального керування із мікросхеми, робочим режимом, частотою та потужністю на інверторі, для живлення роботи індукційної печі в межах резонансу.

Метою роботи є розробка методу, оптимального управління частотою генератора що живить індукційний нагрів, аналізуємо зворотній зв'язок від індуктора, що повертає актуальну потужність в контурі для перевірки на допустиму безпечну потужність системи. Автоматичне регулювання частотою для пониження потужності розігріву, запобігає виходу із справності компонентів пристрою, та недопустить перегрів індуктора печі при довгій роботі на частотах поблизу резонансної.

Ключові слова: ІНДУЦІЙНИЙ НАГРІВ, РЕЗОНАНСНИЙ ІНВЕРТОР, РЕЗОНАНС, ІНТЕГРАЛЬНА СХЕМА.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИДІВ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЕЧІ.....	10
1.1 Принцип роботи індукційного нагрівача	10
1.2 Індукційний нагрів та скін ефект	12
1.3 Вибір індукційної печі для розігріву металів та металоксидів до надвисоких температур	14
1.4 Висновки по розділу	17
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ БЕЗПЕЧНОГО ВХОДУ В РОБОЧИЙ РЕЖИМ РЕЗОНАНСНОГО ІНВЕРТОРА ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЕЧІ	18
2.1 Переваги пристрою із тигельним нагріванням	18
2.2 Вибір типу генератора для живлення індукційної печі	21
2.3 Аналіз основних типів регуляторів частотою інвертора	24
2.4 Регулятор частоти на основі операційних підсилювачів.....	31
2.5 Реалізовані методи для контролю частоти автогенератора.....	32
2.5.1 Регулювання на основі операційних підсилювачів.....	35
2.5.2 Керування потужності на основі ручного управління користувачами (user interface)	36
2.6 Висновки по розділу	36
РОЗДІЛ 3. МІКРОСХЕМИ НА ОСНОВІ ДРАЙВЕРА IR2156 ДЛЯ КЕРУВАННЯ РЕЗОНАНСНИМ ІНВЕРТОРОМ	37
3.1 Мікросхема управління IR 2156	37
3.2 Блок схема драйвера	41
3.3 Дизайнерські рівняння.....	48
3.3.1 Програмування мертвого часу (dead-time).....	48
3.3.2 Частота запуску програми.....	49

3.3.3 Частота програми попереднього нагріву.....	49
3.3.4 Програмування часу попереднього нагрівання	50
3.3.5 Програмування максимального струму запалювання	50
3.4 Діаграма стану	51
3.5 Осцилограма регулятора	53
3.6 Принципова схема. Визначення значень параметрів основних компонентів	54
3.7 Висновки по розділу	61
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....	62
4.1 Опис ідеї проекту	62
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту	66
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартапу.....	68
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	76
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап проекту	79
4.6 Висновки по розділу	83
ВИСНОВКИ.....	84
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	85

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ІС – інтегральна схема

ІМС – інтегральна мікросхема

MOSFET – силовий транзистор

ККД – коефіцієнт корисної дії

ОУ – операційний підсилювач

К_у – коефіцієнт підсилення

АС – змінний струм

DC – постійний струм

ІТП – індукційна тигельна піч

ІПСР – індукційна піч середньої частоти

ІН – індукційний нагрів

ЕРС – електро рушільна сила

ЕМ – електро магнітне

ЕМВ – електро магнітне випромінювання

ВСТУП

Індукційне нагрівання - популярний та інноваційний метод обробки металів із використанням струму високої частоти. В процесі індукційного нагрівання металів, нагрітих електромагнітним випромінюванням, виникає вихровий струм що нагріває метал за законом Джоуля-Ленца.

Котушка індуктора генерує змінне магнітне поле і діє як первинна обмотка імпульсного трансформатора. Матеріал розміщений усередині індуктора так, щоб між індуктивністю та металом був зазор. У цьому положенні він нагрівається і поводить себе як вторинна обмотка трансформатора.

Ефективність енергії від індуктора до нагрітого тіла залежить від величини повітряного проміжку між ними і зростає з його зменшенням. Глибина нагрівання металу збільшується із збільшенням питомого опору і зменшується зі збільшенням частоти сигналу. Струм індуктивності коливається від сотень до тисяч ампер із середньою щільністю струму 25 А/мм². Втрати енергії чистої потужності в індукторі можуть досягати 20-30%.

Електричні індукційні установки поділяються на плавильні, нагрівальні та гартувальні. Печі зазвичай працюють на промисловій частоті 50 Гц, на середній частоті 1 - 100 кГц і високій частоті понад сотні тисяч кГц.

Принцип індукційного нагріву порівняно простий, саме тому він активно використовується в промисловості.

На сьогоднішній день майже немає жодної металургійної компанії, яка б не знала про переваги обладнання індукційного нагріву. Сфера застосування індукції є набагато більшою ніж тільки промисловими підприємствами, високочастотні струми активно використовуються для різного обладнання, але індукційне нагрівання набуло все більшого поширення в промисловості.

На сьогоднішній день індукційний нагрів активно застосовується для наступних видів діяльності підприємств:

- Плавлення різного виду металів і неметалів;
- отримання плазми;
- поверхневого гарту матеріалів;
- зварювання металів;
- нагрівання виробів для деформації;
- зонного очищення напівпровідників і металів;
- отримання монокристалів.

Налаштування автоматизованого контролю системи управління індукційного нагріву і є метою цієї роботи. Для реалізації використаний нестандартний драйвер баласту люмінесцентних ламп IR2156, мікросхема володіє всіма потрібними для нас функціями, також дуже сильно розповсюджена та не дорога в ціні, що і робить її ідеальним застосуванням для вирішення поставленої задачі.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ВИДІВ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЕЧІ

1.1 Принцип роботи індукційного нагрівача

Індукційний нагрівможливий при використанні трох основних елементів які є у всіх видах індуктивних нагрівачів:

- генератор;
- індуктор;
- нагрівальний елемент.

Індуктор представляє собою індуктивну котушку, в більшості випадків виконану із мідного провідника, котушка генерує магнітне поле. Генератор змінного струму потрібний за для отримання високочастотного сигналу із домашньої електромережі яка працює з частотою 50 Гц. Нагрівальним елементом використовується металевий предмет, здатний нагріватися під впливом магнітного випромінювання, тигель.

Якщо правильно поєднати ці елементи, можна отримати високо продуктивний прилад, що прекрасно підходить для розігріву газового, або рідкого теплоносія. За допомогою генератора, змінний струм із необхідними характеристиками надходить для живлення індуктоа, тобто на конденсатр із котушкою. При проходженні через індуктор потоку заряджених частинок відбувається формування магнітного поля.

Принцип індукційних нагрівачів полягає у виникненні електрострумів в середині провідників, що з'являються під впливом магнітного поля.

Особливість поля полягає в тому, що воно здатне на високих частотах до змінення напрямку електромагнітних хвиль. Якщо в поле помістити металевий матеріал, він буде нагріватися без посереднього контакту з індуктором під впливом створених вихрових струмів.

Струм високої частоти надходить від високочастотного генератора до індукційної котушки, тим самим створює магнітне поле що постійно змінює вектор магнітних хвиль (рис. 1.1). Якщо помістити в це магнітне поле який небудь метал, він швидко розігріється.

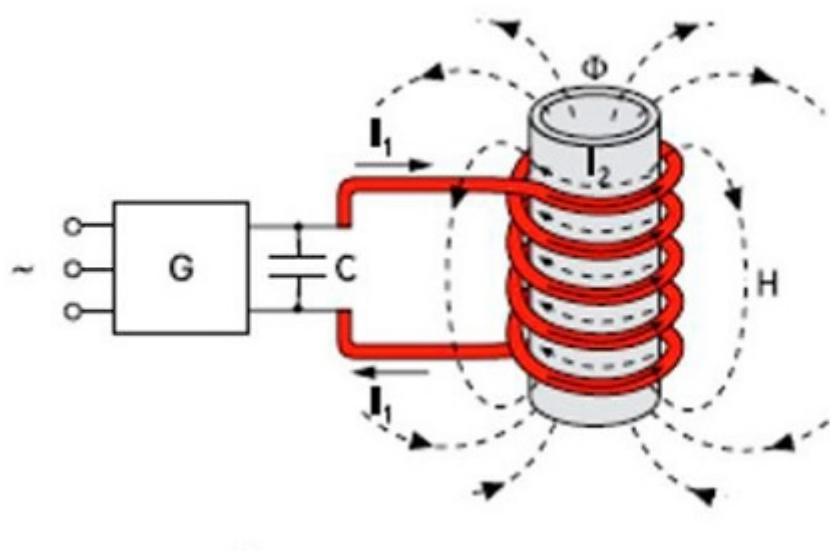


Рис. 1.1 - Схема генерації змінного магнітного поля

Відсутність контактів з котушкою індуктивності дозволяє зменшити втрати енергії при переходах із одного виду агрегатного стану в інший, чим і пояснюється дуже високий ККД індукційних печей.

За для підігріву речовини у нагрівачому контурі, потрібно всьоголиш забезпечити контакт з металічним нагрівачом. В більшості нагрівальний елемент використовують як металеву трубу, через яку забезпечують контакт, або пропускають речовину.

Електромагніт для індукційного нагрівача отримують методом намотування провідника навколо сердечника із феромагнетика. Отримана котушка індуктивності нагрівається та передає тепло нагрівачому матеріалу або протікаючому поблизу теплоносію через радіатор.

1.2 Індукційний нагрів та скін ефект

Індукційний нагрів - супроводжується нагрівання матеріалів та металоксидів електричним струмом, який індукується змінним магнітним полем. Тобто це нагрівання магнітним полем індуктора, виробів матеріалів які проводять струм.

Індукційний нагрів працює наступним чином, електропровідна, наприклад графітова чи металева речовина поміщається в індуктор, що являє собою декілька витків дроту зазвичай мідного. В індукторі за допомогою генератора проходять потужні струми високої частоти від 1 кГц до декількох сотень МГц, в результаті навколо індуктора виникає ЕМ поле. Електромагнітне випромінювання створює в заготівлі вихрові струми, що призводить до розігрівання завдяки дії джоулева тепла.

ЕРС, що виникає в нагрівуючому тілі, пропорційна магнітному потоку що і забезпечує в матеріалі виникнення:

$$E = 4,44 \Phi * w * f,$$

де E – ЕРС, що виникає в тілі;

Φ – магнітний потік, що виробляється індуктором, Вб;

w – кількість витків індуктора;

f – частота напруги живлення, Гц.

Потужність, яка виникає у нагрітому металі, прямо пропорційна квадрату струму на опір тіла що нагрівається:

$$P = I^2 * R,$$

I – вихровий струм, виникає в металі, А;

R – опір металу який нагрівається, Ом

При високих частотах вихрові струми піднімаються створюваним ними магнітним полем у тонкі шари матеріалу поверхні Δ скін ефект, внаслідок чого їх щільність різко збільшується, а заготовка нагрівається. Нижні шари металу нагріваються теплопровідністю. Важливий не струм, а його висока щільність. У шарі Δ щільність струму збільшується в коефіцієнт e порівняно із щільністю струму в заготовці, тоді як скін шар виділяє 85,8% від загальної кількості тепла. Глибина шару залежить від частоти генерації випромінювання, чим вища частота, тим тонкіший скін шар. Це також залежить від магнітної проникності μ заготовленого матеріалу.

В кобальті, залізі, нікелі та магнітних сплавах при температурах нижче точки Кюрі μ має значення від кількох сотень до десятків тисяч. В інших матеріалах, кольорові метали, сплави, свинцева кераміка, графіт тощо, μ прагне до одиниці.

Формула глибини скін-шару в мм:

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}}$$

ρ - питомий електричний опір заготовки при температурі нагріву, (Ом \cdot м),

f – частота генерації електромагнітного поля, (Гц).

Приведемо приклад, на частоті 2 МГц глибина скін шару заліза 0,0001 мм., для міді 0,047 мм.

Під час роботи, індуктор дуже сильно нагрівається, тому що поглинає власне випромінювання. Крім того впливає ще поглинання теплового випромінювання від розігрітої заготовки. Зазвичай індуктори роблять із мідних трубок охолоджуваних рідиною. Цим забезпечують безпеку в разі розгерметизації частини індуктора.

1.3 Вибір індукційної печі для розігріву металів та металоксидів до надвисоких температур

Умовно можна розділити індукційні печі на типи:

- Печі з магнітопроводом.
- Без магнітопровода.

Перший тип печей містить індуктор, укладений у метал, що створює особливий ефект, що підвищує щільність магнітного поля, тому нагрівання здійснюється якісно і швидко. В печах без магнітопровода індуктор знаходиться зовні.

Індукційні печі можна розділити на види, які мають свої особливості роботи і відмітними ознаками. Одні служать для робіт в промисловості, інші застосовуються в побуті, для приготування їжі.

Вакуумні індукційні печі - така піч призначена для плавки і лиття сплавів індукційним методом. Вона складається з герметичної камери, в якій розташована тигельна індукційна піч з ливарної форми.

У вакуумі можна забезпечити вчинені металургійні процеси, отримувати якісні виливки. В даний час вакуумне виробництво перейшло на нові технологічні процеси з безперервних ланцюжків в вакуумному середовищі, яка дає можливість створювати нові вироби, і зменшувати витрати виробництва.

Принцип дії вакуумної печі полягає в тому, що в тиглі, що знаходиться у вакуумі за допомогою індуктора високої частоти плавлять тверду шихту і очищають рідкий метал. Вакуум створюється шляхом відкачування повітря насосами. При вакуумній плавці досягається велика зниження водню і азоту.

Канальні індукційні печі - прилад з електромагнітним сердечником широко застосовуються в ливарному виробництві для кольорових і чорних металів в якості роздавальних печей, міксерів.

Змінний магнітний потік проходить по магнітопровода, контуру каналу у вигляді кільця з рідкого металу. У кільці збуджується електричний струм, який

розігріває рідкий метал. Магнітний потік утворюється первинною обмоткою, що працює від змінного струму.

Щоб посилити магнітний потік, використовується замкнутий магнітопровід, який виконаний з трансформаторної сталі. Простір печі з'єднується двома отворами з каналом, тому при наповненні печі рідким металом створюється замкнутий контур. Піч не зможе працювати без замкнутого контуру. У таких випадках опір контуру великий, і в ньому тече малий струм.

Внаслідок перегріву металу і дії магнітного поля, яке прагне виштовхнути метал з каналу, рідкий метал в каналі постійно рухається. Так як метал в каналі нагрітий вище, ніж у ванні печі, то метал постійно піднімається в ванну, з якої надходить метал з меншою температурою.

Якщо метал злити нижче допустимої норми, то рідкий метал буде викидатися з каналу електродинамічною силою. У підсумку відбудеться мимовільне вимикання печі і розрив електричного контуру. Щоб уникнути таких випадків печі залишають деяку кількість металу в рідкому вигляді.

Тигельні індукційні печі - основними компонентами тигельної печі є індуктор і генератор. Для виготовлення індуктора використовується мідна трубка у вигляді намотаних 8-10 витків. Форми індукторів можуть виконуватися різних видів.

Цей вид печі найбільш поширений. В конструкції печі немає сердечника. Поширена форма печі являє собою циліндр з вогнестійкого матеріалу. Тигель знаходиться в порожнині індуктора. До нього підводиться живлення змінного струму.

Найбільш поширені тигельні печі, в яких немає магнітопроводу. Його відсутність в печі призводить до того, що магнітний потік створений струмом промислової частоти, сильно розсіюється в просторі. Більш високі частоти слід використовувати для збільшення щільності магнітного поля в діелектричному тиглі для плавлення матеріалу. Вважається, що якщо ланцюг індуктора знаходиться в резонансі з частотою поточної напруги, а діаметр тигля

порівнюється з довжиною хвилі резонансу, в тиглі може бути зосереджено 75% енергії ЕМ поля.

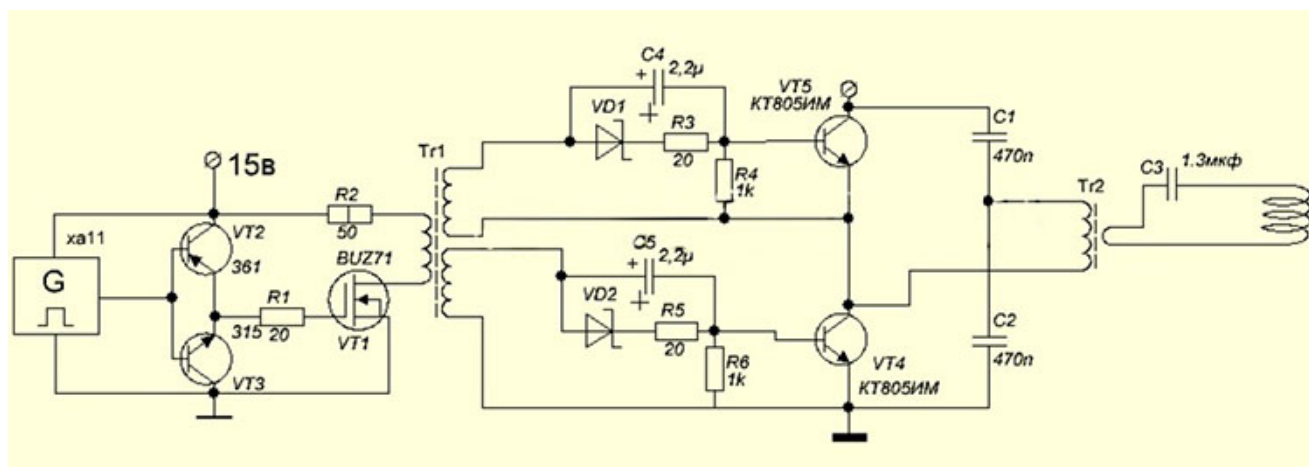


Рис. 1.2 - Схема індукційної печі

Дослідження показали, що для забезпечення ефективного плавлення металів у тигельній печі бажано, щоб частота представленої напруги індуктора була в 2-3 рази вище резонансної частоти. Тобто така піч працює на гармоніці другої або третьої частоти. Робота на цих більш високих частотах краще змішує сплав і покращує його якість.

Режим, який використовує навіть більш високі частоти, п'ятої або шостої гармоніки, може бути використаний для поверхневої карбонізації або зміцнення металу, що пов'язано із скін ефектом, тобто зміщенням високочастотного електромагнітного поля на поверхню заготовки.

1.4 Висновки по розділу

У цьому розділі розглядаються принцип роботи індукційних печей, їх типи, частоти які необхідні для роботи, і схеми типових застосувань, також нюанси у використанні.

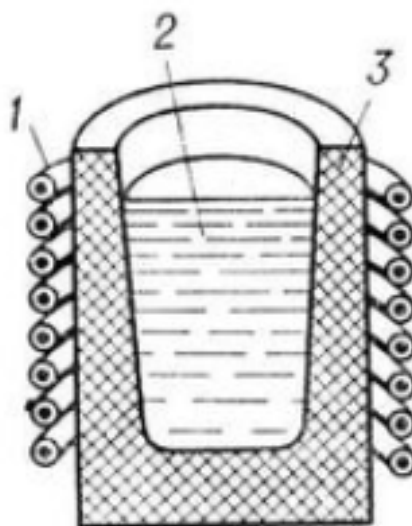
У подальшій роботі буде використана індукційна піч з тигельним нагріванням, тому що вона працює на високих частотах, і ми зможемо використовувати скін-ефект на нашому індукторі.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ БЕЗПЕЧНОГО ВХОДУ В РОБОЧИЙ РЕЖИМ РЕЗОНАНСНОГО ІНВЕРТОРА ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЕЧІ

2.1 Переваги пристрою із тигельним нагріванням

Індукційна тигельна піч за принципом роботи схожа до повітряного трансформатора. Первинна обмотка це індуктор, вторинна обмотка яка також бере на себе функцію навантаження – розплавлений металічний матеріал у тиглі, який перебуває у середині індуктора. Піч набуває форми плавильного тигеля, як правило циліндричної форми, побудованої із вогнетривкого матеріалу що знаходиться в середині індуктора. Підключення здійснюється до джерела змінного струму (рис. 2.1).



1 - індуктор, 2 - тигель, 3 – розплавлений метал

Рис. 2.1 - Схема індукційної тигельної печі

Розрізняють відкриті печі (плавка на повітрі), компресійні (плавка під надлишковим тиском) і вакуумні (плавка у вакуумі).

В залежності від конструкції тигля, розрізняють печі з керамічним тиглем, із провідним металевим тиглем, провідним графітовим тиглем та із холодним тиглем (водоохолодження тигля).

У тигель можна закласти металічну стружку будь-якого походження: відходи ливарного виробництва, дрібна стружку, тощо.

В більшості випадків індуктори виготовляють із мідної трубки, круглого або квадратного перетину, охолоджуваного водою. Обмотка складається із декількох котушок, із роздільним водяним охолодженням.

У ІТП великого об'єму застосовують джерела живлення промислової частоти (50 Гц), менше середньої ємності використовують підвищену та високу частоту.

Не електропровідні тигелі виготовляють із кварцевих, магнетизованих та цирконієвих матеріалів. Вони не поглинають енергію магнітного поля, а також служать теплоізолятором між розплавленим металічним матеріалом і охолоджуваними стінками індуктора (радіатором).

Електропровідні тигелі створюють з жаротримких металів, графітів і легованих чавунів. Дані матеріали поглинають саму більшу частку енергії змінного електро-магнітного поля. Розігрівання до надвисоких температур металів тигельною пічю, відбувається за рахунок ЕМВ.

Технічні характеристики печі:

- Середній ККД тигельної печі 0,65 – 0,95.
- Коефіцієнт потужності ІТП $\cos f = 0,05 - 0,3$.
- Для уникнення проблем, реактивну потужність потрібно компенсувати установкою із конденсаторів. Потужність ІТП може досягати 4500кВт.
- Всі плавильні індукційні печі належать до електроприймачів II категорії, в надійності електропостачання.
- Живлення підвищеної та високої частоти здійснюється від тиристорних або машинних перетворювачів індукторного типу.

Сьогодні дуже популярною та із великим попитом на ринку, розробляють індукційні тигельні печі середньої частоти нового покоління.

Вже розроблено низку індукційних тигельних печей середньої частоти (ІПСЧ) для швидкісного плавлення кольорових та чорних металів, що відповідають вимогам металургійного таливарного виробництва. Найкращі показники ефективності ІПСЧ здебільшого реалізовані шляхом оптимального вибору геометричних параметрів індуктора, частоти струму резонансу та питомої активної потужності, а також за допомогою товщини перерізу котушок і фізичних характеристик.

Основні переваги тигельних печей:

- енергія виділяється при завантаженні матеріалу в піч, тому допоміжні нагрівальні елементи не потрібні;
- можливість одержання однорідних по хімічному складу сплавів через циркуляцію розплаву;
- можливість створення в печі будь-якої атмосфери (окисної, відновленої, нейтральної) при будь-якому тиску;
- висока продуктивність;
- перерви в плавлі металу не впливають на ефективність роботи, так як для розігріву не потрібно багато електроенергії;
- можливість швидкого переходу від одного сплаву до іншого;
- немає місцевих перегрівів, температура вирівнюється по всьому об'єму ванни;
- простота і зручність обслуговування печі, керування і широкі можливості для автоматизації;
- дозволяє підвищити продуктивність праці, значно поліпшити санітарно-гігієнічні умови виробництва, виключити забруднення повітряного басейну.

Недоліки тигельних печей:

- мінімальна температура шлаків, що застосовуються для обробки дзеркала розплаву;
- мала стійкість футеровки при різких температурних перепадах.

Найважливішими елементами тигельної печі індукційного типу є:

- індуктор;
- тигель;
- генератор напруги живлення.

2.2 Вибір типу генератора для живлення індукційної печі

Для живлення тигельної печі індукційного типу, необхідні високочастотні імпульси змінного струму. Тому ми зупинемся на генераторах змінного струму.

Генератор високої частоти змінного струму – ще один найважливіший елемент тигельної пічки індукційного типу. Розглянемо декілька типів генераторів:

- генератор на тиристорах;
- генератор на транзисторі;
- генератор на МОП-транзисторах.

Найпростішим генератором змінного струму для живлення індуктора є **генератор з самозбудженням**, схема якого має один транзистор типу КТ825, два резистора і котушку зворотного зв'язку. Такий генератор може виробляти потужність до 300 Вт, а регулювання потужності генератора здійснюється шляхом зміни постійної напруги джерела живлення. Джерело живлення повинно забезпечувати струм до 25 А.

Пропонований для тигельної печі **генератор на тиристорах** включає в схему тиристор типу T122-10-12, динистор КН102Е, ряд діодів і імпульсний трансформатор. Тиристор працює в імпульсному режимі.

Такі надвисокочастотні випромінювання можуть негативно вплинути на здоров'я людини. Для даного генератора, як показали розрахунки, це випромінювання на відстані в 2,5 м від джерела досягає 1,5 Вт / м². Така величина є неприйнятною.

Розглянемо детальніше **генератор на МОП-транзисторах**, так як ними можна генерувати струм найбільшої частоти (рис. 2.2).

Генератор на МОП транзисторах має містити в собі чотири МОП транзистори такі як IRF520 та IRFP450 і являти двотактний генератор або напів міст з незалежним збудженням. Для задання частоти на генераторі використовується мікросхема типу IR21xx. Для запобігання перегріву транзисторів потрібно застосувати радіатор мінімум 500 см² і повітряне обдування.

Так як в проекті ми поставили задачу по роботі індуктора на максимальних потужностях, реалізація зазначеної ідеї передбачує роботу нагрівача на частотах близьких до резонансної, а також автоматичне керування перестройкою по частоті, за для безпечного керування потужності в системі, щоб уникнути перегріву, та вихід із ладу компонентів пристрою.

Тому для детальнішого заміру частоти, та робота на більших і стабільних потужностях індуктора, а також для відносно рівномірного розігріву, вибраний генератор має подавати змінний струм для живлення печі не імпульсами як це передбачено генератором, а зглаженим, бажано гармонічним сигналом.

Отже ми оберемо **модернізувати схему генератора на МОП-транзисторах (інвертор)**, за для зглаження силового сигналу в гармонічний вид. Реалізувати такий фільтер можна за допомогою трансформатора, просто пропустивши

вихідний сигнал через первину котушки, а живлення індуктора здійснювати із вторинної котушки. Ця доробка також допоможе нам вирішити ще одну проблему, пов'язану із живленням Індуктора дуже малою напругою і дуже великою силою струму, щоб цього досягти потрібно вторину обмотку трансформатора зробити із багатьох паралельно зєднаних котушок.

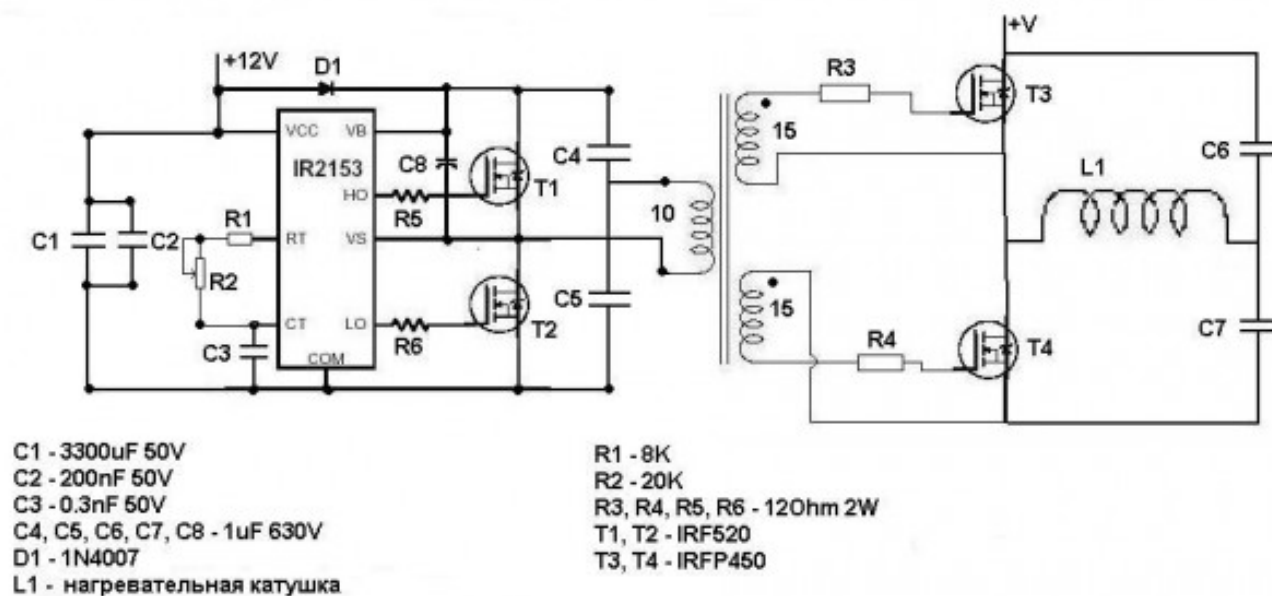


Рис. 2.2 - Схема індукційної печі із генератором на МОП транзисторах та інвертором (драйвер IR21xx подібний до нашого зразка)

Вибраний генератор на МОП-транзисторах та трансформаторі може забезпечити потужність до 1 кВт, міняючи частоту коливань в межах від 5кГц до 15МГц. Завдяки чому піч використовуючи такий генератор, буде працювати в режимах плавлення і поверхневого нагрівання.

2.3 Аналіз основних типів регуляторів частотою інвертора

Аналогові контролери в системах управління засновані на операційних підсилювачах (ОП) - підсилювачах постійного струму із високим входним та низьким вихідним опором. Зараз технологія інтегральних схем здатна виробляти високоякісні та недорогі операційні підсилювачі. У якійсь частині свого робочого діапазону операційний підсилювач поводить себе як підсилювач лінійної напруги з дуже високим коефіцієнтом посилення ($10^5 - 10^6$). Якщо схема операційного підсилювача не забезпечує негативний зворотний зв'язок із виходу на вхід, то через високий коефіцієнт підсилення він обов'язково перейде у режим насичення. Тому схеми регуляторів на основі операційних підсилювачів мають негативний зворотний зв'язок.

ОП отримав свою назву завдяки тому, що він може використовуватися для виконання різних математичних операцій, таких як множення, додавання, інтегрування та диференціювання. Типові регулятори засновані на інвертуючому посиленні, а входні та вихідні схеми можуть містити ємність в додаток до опору.

Так як коефіцієнт підсилення операційного підсилювача великий ($K_u = 10^5 - 10^6$), а вихідна напруга U_{out} обмежується напругою живлення, тоді потенціал точки А (рис. 2.1) $U_A = I_{out} / K_u$ близьким нулю, тобто точка А буде виконувати функцію землі.

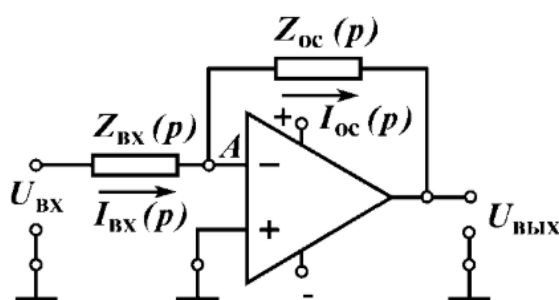
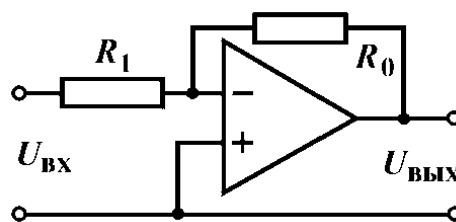
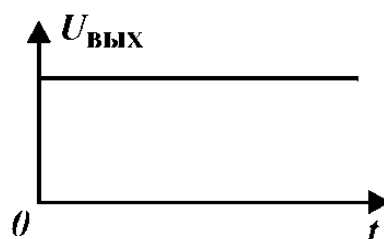


Рис. 2.1 - Аналоговий регулятор, виконаний на операційному підсилювачі.
Пропорційний регулятор з керованим обмеженням для вихідного сигналу

Передавальні функції, схеми та перехідні функції різних типів регуляторів:

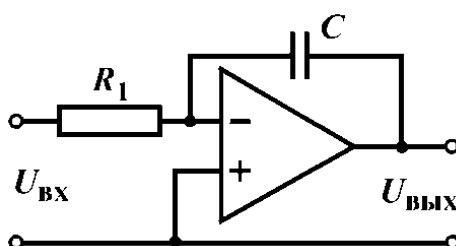


а) Схема регулятора

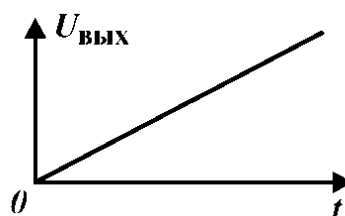


б) Перехідна функція регулятора

Рис. 2.2 - Тип регулятора Пропорційний (П)



а) Схема регулятора



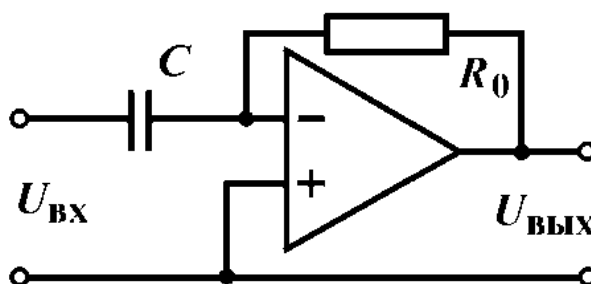
б) Перехідна функція регулятора

Рис. 2.3 - Тип регулятора Інтегральний (І)

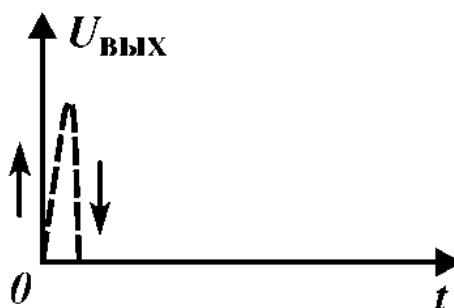
Передавальна функція регулятора, рівняння:

$$W_p(p) = \frac{I}{\tau p} = \frac{K_p}{p}$$

$$K_p = \frac{I}{\tau}$$



а) Схема регулятора

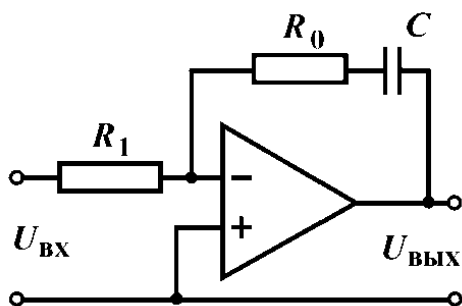


б) Перехідна функція регулятора

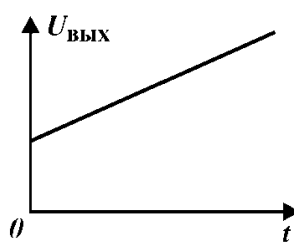
Рис. 2.4 - Тип регулятора Диференційний (Д)

Передавальна функція регулятора, рівняння:

$$W_p(p) = \tau p = K_p p$$



а) Схема регулятора



б) Перехідна функція регулятора

Рис. 2.5 - Тип регулятора пропорційно-інтегральний (ПІ)

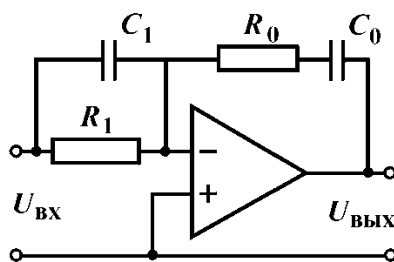
Передавальна функція регулятора, рівняння:

$$W_p(p) = K_p \frac{\tau_1 p + 1}{\tau_1 p} = K_p + \frac{1}{\tau_0 p}$$

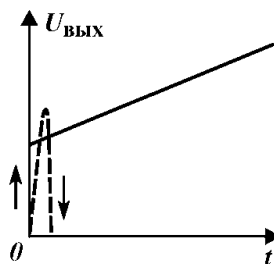
$$K_p = \frac{R_0}{R_1}$$

$$\tau_1 = CR_0$$

$$\tau_0 = CR_1$$



а) Схема регулятора



б) Перехідна функція регулятора

Рис. 2.6 - Тип регулятора пропорційно-інтегральний-диференційний (ПІД)

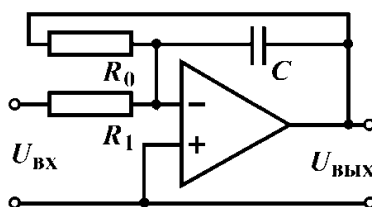
Передавальна функція регулятора, рівняння:

$$W_p(p) = K_p \frac{(\tau_1 p + 1)(\tau_2 p + 1)}{\tau_1 p} = K_p \left(1 + \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) + \frac{1}{\tau_1} p + \tau_1 p$$

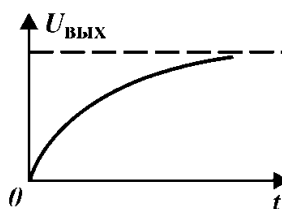
$$K_p = \frac{R_0}{R_1}$$

$$\tau_1 = R_0 C_0; \tau_2 = R_1 C_1$$

$$\tau_n = R_1 C_0; \tau_d = R_0 C_1$$



а) Схема регулятора



б) Перехідна функція регулятора

Рис. 2.7 - Тип регулятора Аперіодичний (А)

Передавальна функція регулятора, рівняння:

$$W_p(p) = \frac{K_p}{\tau p + 1}$$

$$K_p = \frac{R_0}{R_1}$$

$$\tau = R_1 C$$

Щоб отримати пропорційний регулятор (П-регулятор, див. Рис. 2.1 та рис. 2.2), на вході та в ланцюзі зворотного зв'язку ОП включіть резистори, інтегрований регулятор (І-регулятор, рис. 2.3), підключіть резистор до вхідного ланцюга, а ланцюг зворотного зв'язку до конденсатора, ПІ-регулятор (див. рис. 2.5), у вхідному ланцюзі до резистора, а в ланцюзі зворотного зв'язку до резистора та конденсатора, з'єднаних послідовно. ПІД-регулятор (рис. 2.6) виконується на одному підсилювачі за використанням активно-ємнісних схем на вході та в схемі зворотньої відповіді.

Промисловість виробляє різні типи операційних підсилювачів з інтегральною схемою (ІС), кругові, так і прямокутні. Найпоширенішими регуляторами з точки зору конструкції були типи К140UD7, К553UD2, К157UD2 та інші.

Обмеження параметрів на електроприводі струму, напруги тощо, здійснюється шляхом включення обмежувальних вузлів у зовнішній контур управління. Можуть бути контрольованими та неконтрольованими. На рис. 2.8 показана схема обмеження вихідної напруги П-регулятора з діодами відсікання VD1 і VD2 та контрольованою опорною напругою. Схема дозволяє отримати асиметричність щодо початку вхідно-вихідних характеристик з різними рівнями обмеження вихідної напруги (рис. 2.9). Також існують й інші варіанти регульованого обмеження вихідної напруги ОП за допомогою транзисторів.

Донедавна методи засновані на аналогових комп'ютерних технологіях, в основному використовувались в автоматизованому електроприводі побутової

техніки. В останні роки низка проектних та дослідницьких організацій працює над створенням мікропроцесорних систем управління. У порівнянні з аналоговими системами мікропроцесорні системи мають ряд переваг.

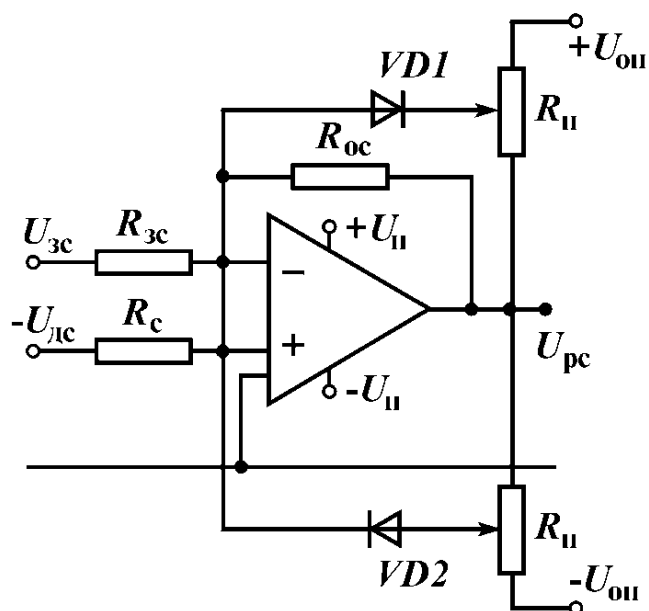


Рис. 2.8 - Схема пропорційного регулятора з керованим обмеженням вихідного сигналу

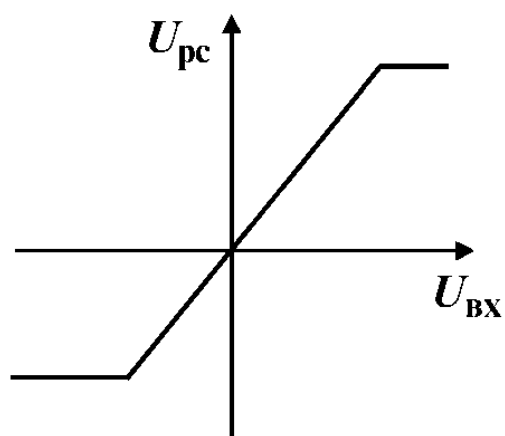


Рис. 2.9 - Характеристика регулятора із керованим обмеженням сигналу

2.4 Регулятор частоти на основі операційних підсилювачів

У нашій дисертації регулювання по робочій частоті коливань повинен працювати автоматично. Здійснювати регулювання напругою та створювати імпульсами можна за допомогою ОП, саме тому я обрав цей метод застосування. Керування частотою має працювати в моменти часу коли частота на індукторі наближається до резонансної та досягає небезпечних амплітуд коливань, у такому випадку необхідно збільшити робочу частоту вище резонансної.

Для керування по частоті на мікросхемі відповідає конденсатор на вході СТ, а саме час за який він заряджається (див. рис. 2.10).

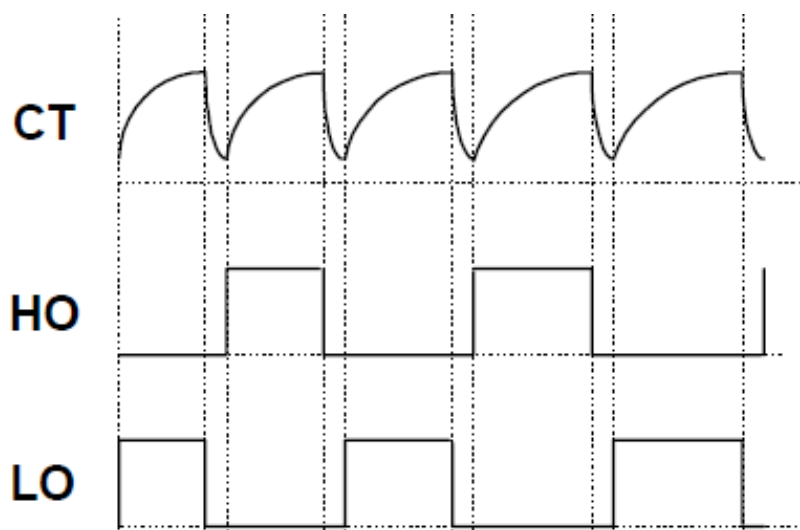


Рис. 2.10 - Осциллограмма сигнала через конденсатор СТ

Ми можемо спостерігати на осциллограмі що час заряду конденсатора впливає на частоту генератора, тобто якщо зменшити час за який буде заряджатися конденсатор, ми зможемо збільшити частоту коливань на автогенераторі.

Тобто якщо ми в певний момент часу подамо більшу напругу на контакт із конденсатором він заповниться швидше, що вплине на частоту коливань.

Класична синхронізація, або ж блокування частоти відбувається коли на генератор, що працює на частоті f_0 , впливає зовнішній сигнал на частоті f_1 ,

близькій до f_0 . Синхронізація - це зміна частоти коливань генератора, внаслідок чого вона стає рівною частоті зовнішнього сигналу. В нашому випадку імпульси синхронізації повинні формуватися, коли задана амплітуда коливань в схемі резонансного контуру буде близькою до резонансу, коли ця схема живиться від інвертора який підсилює коливання генератора під дією синхронізації. Завдяки цьому частота генератора завжди буде вище частоти резонансу індуктора, тим паче чим менша амплітуда коливань у ланцюзі, тим вище частота коливань.

Цей метод дає нам гарантоване обмеження амплітуди та частоти коливань резонансного контура, навіть при зменшенні з часом ємності конденсаторного блоку, коли ємність цієї батареї з часом зменшується, а резонансна частота індуктора зростає.

2.5 Реалізовані методи для контролю частоти автогенератора

Для розроблюваного приладу я вирішив використати два абсолютно різні методи контролю частоти автогенератора, але в край необхідні для максимальної реалізації всього потенціалу який може запропонувати даний індуктивний нагрівач матеріалів.

Завдяки можливості контролю частоти коливань автогенератора різними методами, а також багатьма необхідними функціями які можуть надати кожен із способів регулювання, було прийняте рішення використати два методи керування перестройкою по частоті автогенератора, один з яких автоматичне регулювання частотою, і другий користувацького налаштування доповнюючий перший в залежності у якому режимі перебуває даний прилад, режими переключаються і задаються тільки в ручному режимі користувачем.

Пріоритет такої реалізації в тім, що в даної індуктивної печі буде два режими роботи:

- Перший, він же основний, нагрів відбувається без настройки яких будь параметрів подальшого процесу. Даний режим створений і представляє

собою функцію розігріву металів та металоксидів до над високих температур, за рахунок робочого процесу при частотах коливань контуру близьких до резонансної частоти індуктора, а також автоматичному регулюванню тієї ж частоти при сильному нагріву котушки або занадто близьких коливань до резонансних. Частота автогенератора завжди підстроюється для роботи індуктора на максимальній та оптимальній потужності в даний момент часу. Даний режим використовується в основному для розплавлення металів, металоксидів і подібних матеріалів, та дуже сильного нагрівання їх же самих.

- Другий метод регулювання який використався в даному приборі, він же додатковий, увімкнення і налаштування здійснюються користувачем, реалізовує роботу системи по нагріванню металічних матеріалів в залежності від параметрів заданих користувачем на блок-панелі приладу. Суть даного режиму роботи полягає у коливаннях автогенератора при фіксованій робочій частоті, яка в свою чергу задається користувачем за допомогою регулятора на блок-схемі прибору. В даному режимі роботи авторегулювання частоти генератора не працює, потужність на індукторі пічки завжди залишається не змінна для налаштованих параметрів. Пріоритетом описаного метода є можливість при запущеному процесі нагрівання, керувати через блок-панель частотою автогенератора, користувач під час процесу нагрівання може змінювати потужність розігріву в залежності від своїх універсальних потреб. Режим використовується безпосередньо для розігріву металів, металоксидів, до відносно не великих температур, може бути корисний в дослідженні, вирощуванні, аналізі матеріалів. Фіксована потужність нагрівання (випромінювання) буває дуже корисною в науковій діяльності.

Робота та технічний стан прибору при поточному режимі абсолютно безпечні на будь яких налаштуваннях частоти коливань автогенератора, так як схема регулювання частоти для запобігання резонансу активна завжди. Коливання індуктора завжди поза небезпечною резонансною смугою частот. Навіть у випадку, якщо резонанс контуру зміститься.

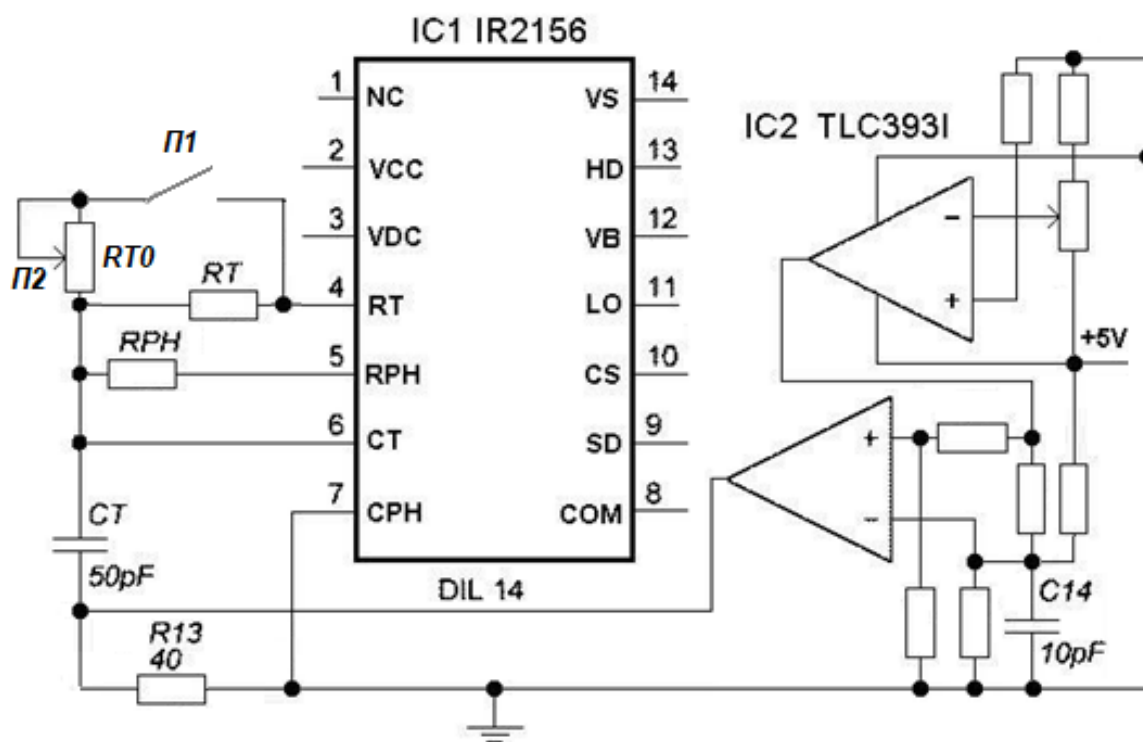


Рис. 2.11 - Схема регулювання частоти

2.5.1 Регулювання на основі операційних підсилювачів

Схема керування частотою побудована на двох операційних підсилювачах з'єднаних послідовно, вихідний сигнал надходить на контакт конденсатора СТ, що в свою чергу вплине на частоту коливань автогенератора (рис. 2.11).

Схема працює від напруги в 5 В, яка потрапляє на компаратор із DC-DC перетворювача. Керування здійснюється автогенерацією імпульсів напруги які надходять на конденсатор СТ щоб він швидше зарядився тим самим збільшуючи

частоту на генераторі, керування відбувається коли потужність індуктора перевищує допустиму задану норму, це відбувається при резонансі. Осцилограма сигналу конденсатора СТ, та сигналу на виході ОП коли здійснюється регулювання частоти, показана на (рис. 2.12).

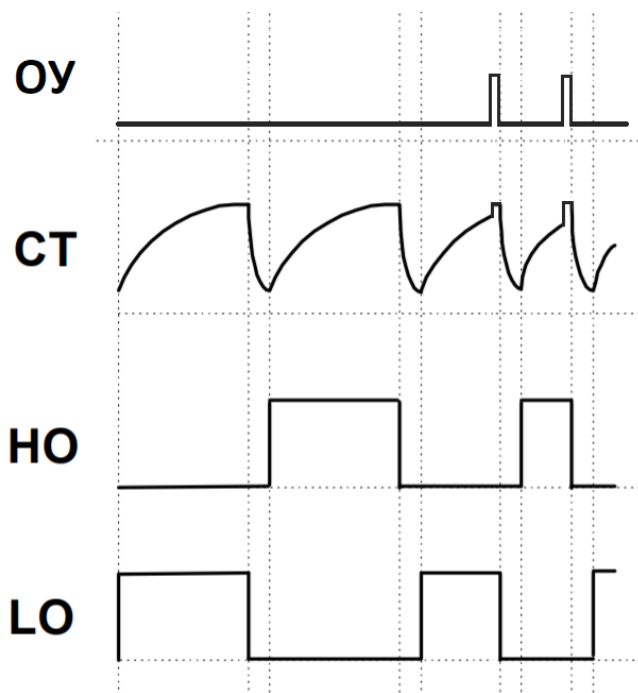


Рис. 2.10 - Осциллограмма роботи конденсатора СТ та компаратора при регулюванні частотою

2.5.2 Керування потужності на основі ручного управління користувачами (user interface)

Схема ручного управління частотою строїться на основі змінного резистора RT0, який програмує частоту автогенератора вже за відомим методом, підключення до контакту RT на IC (рис. 2.11).

Просто кажучи ми даємо користувачам доступ до програмування робочої частоти нагрівання. Змінний резистор RT0 підключений паралельно до резистора RT завдяки вимикачу для даного режиму, таким чином при керуванні робочої частоти

ми будемо зменшувати загальний опір на контакті RT, а це приводить тільки до збільшення частоти.

Схема управління П2 використовує регулятор (змінний резистор RT), та перемикач П1 для увімкнення.

2.6 Висновки по розділу

В даному розділі я вибрав тип індукційної печі розглянувши переваги та недоліки її у використанні.

Я описано багато методів керування на основі ОП. Я обрав метод синхронізації який на мою думку підходить найбільше, та описав методи керування за рахунок компонентів які впливають на вхідний сигнал мікросхеми, а саме конденсатор на вхід СТ і блок із резисторів на вхід RT.

Також я вибрав тип генератора який буде використовуватись для живлення індукційної печі. На мою скромну думку, генератор змінного струму на МОП транзисторах та імпульсному трансформаторі для реалізації поставлених задач, підходить саме краще.

Реалізовані два методи керування частотою, автоматичний і ручний. Схема переключення між ними виконана за допомогою перемикача, який підключає контактний вузол ручного регулятора до контакту RT на мікросхемі.

РОЗДІЛ 3

МІКРОСХЕМИ НА ОСНОВІ ДРАЙВЕРА IR2156 ДЛЯ КЕРУВАННЯ РЕЗОНАНСНИМ ІНВЕРТОРОМ

3.1 Мікросхема управління IR 2156

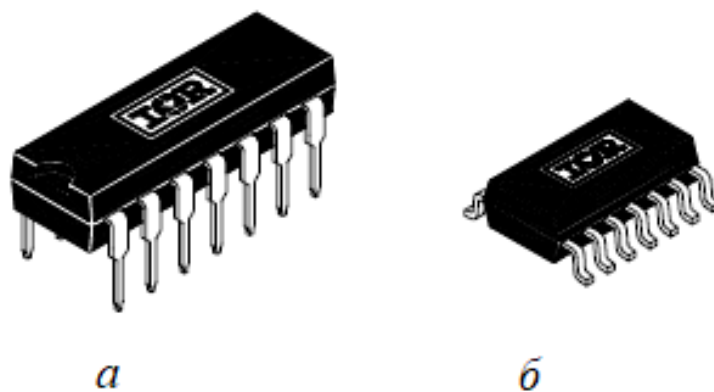
Особливості мікросхеми IR2156:

- Напівмостовий драйвер та управління баластом в одній ІС;
- Робоча частота програмуєча;
- Час підігріву програмований;
- Частота розігріву програмована;
- Рампа запалення внутрішня;
- Максимальний струм програмований;
- Програмований час між імпульсами;
- Шина постійного струму із відновленням напруги;
- Вимкнення гістерезисом;
- Вбудований стабілітрон обмеження (15.6 В) на контакті V_{сс};
- Старт на малопотужніх токах (150 мкА);
- Захист електростатичного розряду (ESD) та стійкі вихідні комутатори;
- Широкі межі програмованої частоти (100 Гц – 10 МГц);
- Надійність у використанні.

Внутрішня блок-схема IR2156, показана на (рис. 3.2), являє собою високовольтний драйвер напівмосту з програмованим генератором, а також забезпечує логічну схему для повної мікросхеми управління баластом. Функції IR2156 включають програмований попередній нагрів та робочу частоту, програмований час попереднього нагрівання, програмований час затримки імпульсів та програмований захист від перевантаження.

В конструкцію були включені такі геніальні функції захисту, як захист від несправності лампи у разі деформації корпусу, несправності нитки розжарювання, а також функція автоматичного перезапуску. Мікросхема доступна в таких корпусах, 14-виходів PDIP (рис.3.1 (а)) і 14-виходів SOIC (рис.3.1 (б)).

Розташування контактів драйвера показано на рис 3.3, та їх призначення описано в таблиці 3.1.



а – 14-контактів PDIP;

б – 14-контактів SOIC (корпус вузький)

Рис.3.1 - Корпус IR 2156

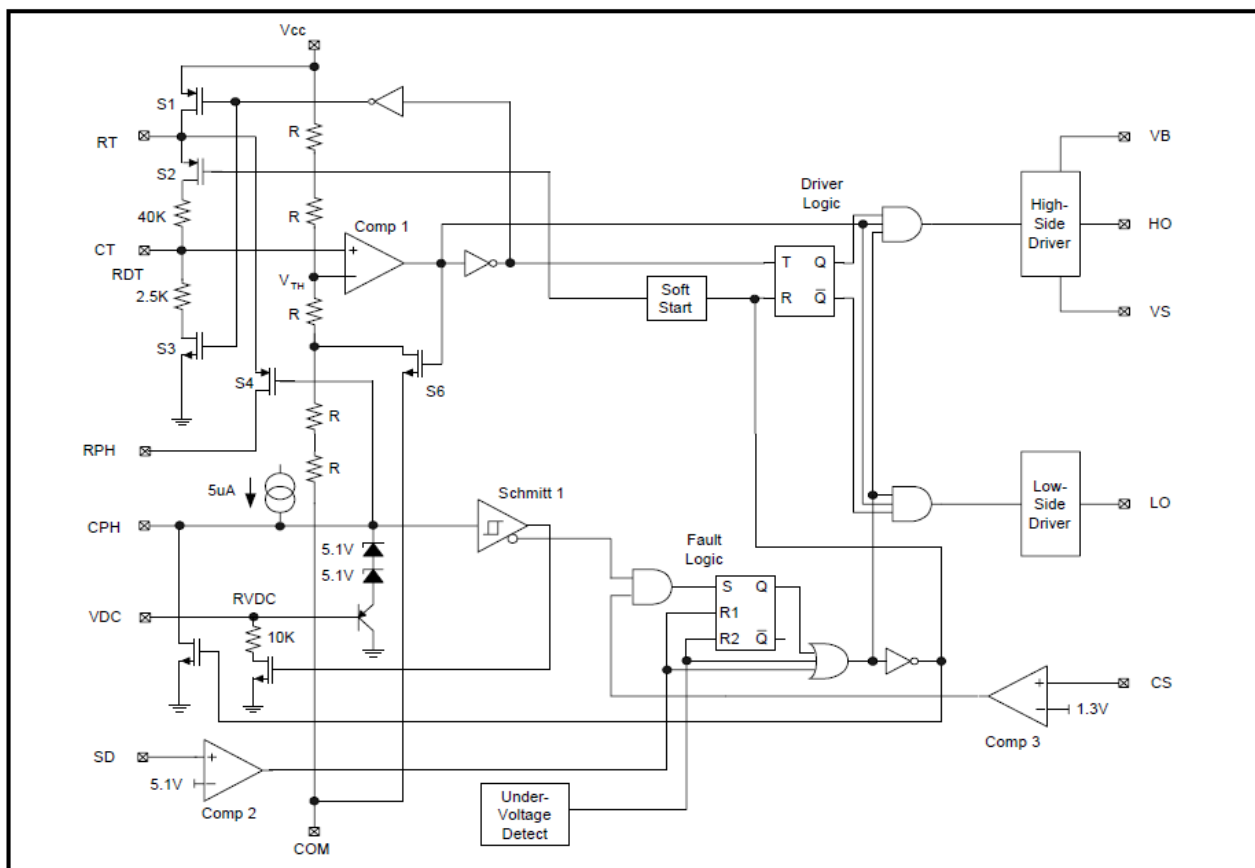


Рис.3.2 - Блок схема IR 2156

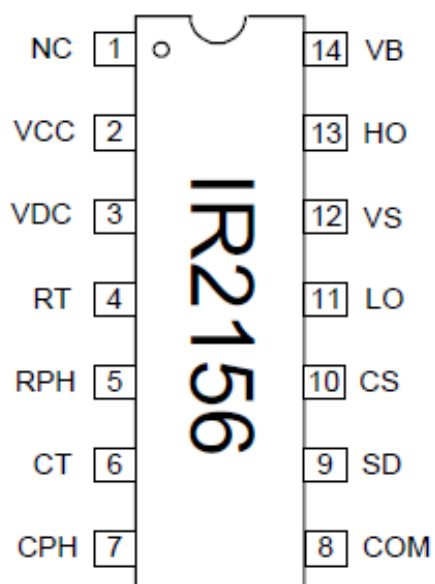


Рис.3.3 - Призначення контактів

Таблиця 3.1 - Опис контактів ІМС

N	Символ	Функція
1	NC	Нема застосування
2	VCC	Низькопотужне живлення драйвера та логіки
3	VDC	Живлення старту мікросхеми і контроль шини постійного струму
4	RT	Програмуючий резистор робочої частоти
5	RPH	Програмуючий резистор частоти попереднього нагріву
6	CT	Програмуючий конденсатор частоти і мертвого часу на генераторі
7	CPH	Програмуючий конденсатор часу попереднього нагріву
8	COM	Загальне живлення схеми та сигналів (земля)
9	SD	Вхід для виключення
10	CS	Вхід для резистора контролю струмом
11	LO	Вихід низьковольтного сигналу генератора
12	VS	Плаваюче повернення високовольтної частини
13	HO	Вихід високовольтного сигналу генератора
14	VB	Лінія живлення високовольтного генератора

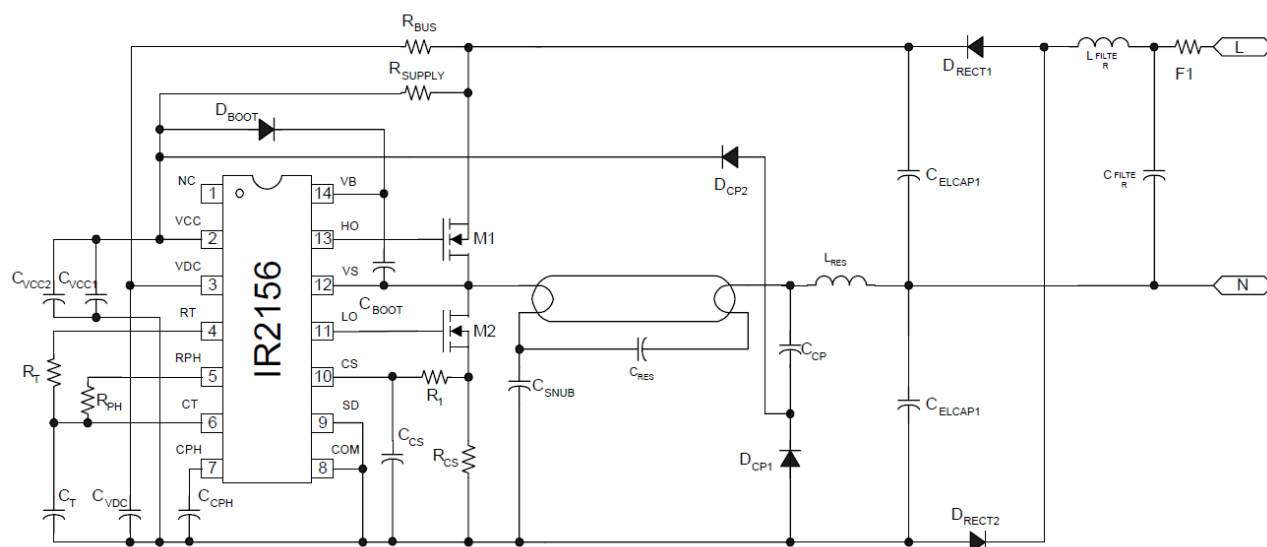


Рис.3.4 - Підключення типового застосування ІМС

3.2 Блок схема драйвера

Блок-схему драйвера можна розділити на кілька розділів, вони відповідають певному режиму роботи IR2156, такі як режим нагріву і нормальна робота. Режим управління нагріванням і режими що відповідають за розпалювання і нормальну роботу, тісно пов'язані з конструкцією пристрою. У цьому пункті описується їхня робота, взаємодія і використання.

Режим блокування під напругою (UVLO) стан ІС коли VCC нижче порогової напруги. Розглянути різні режими роботи мікросхеми, можна на (рис. 3.7). Блокування при мінімальній напрузі призначене для низького струму, менше 200 мкА, та для гарантії що мікросхема повністю функціональна для початку роботи генератора на високих і низьких частотах сигналу.

Ефективне постачання напруги показане показане на рис. 3.5.

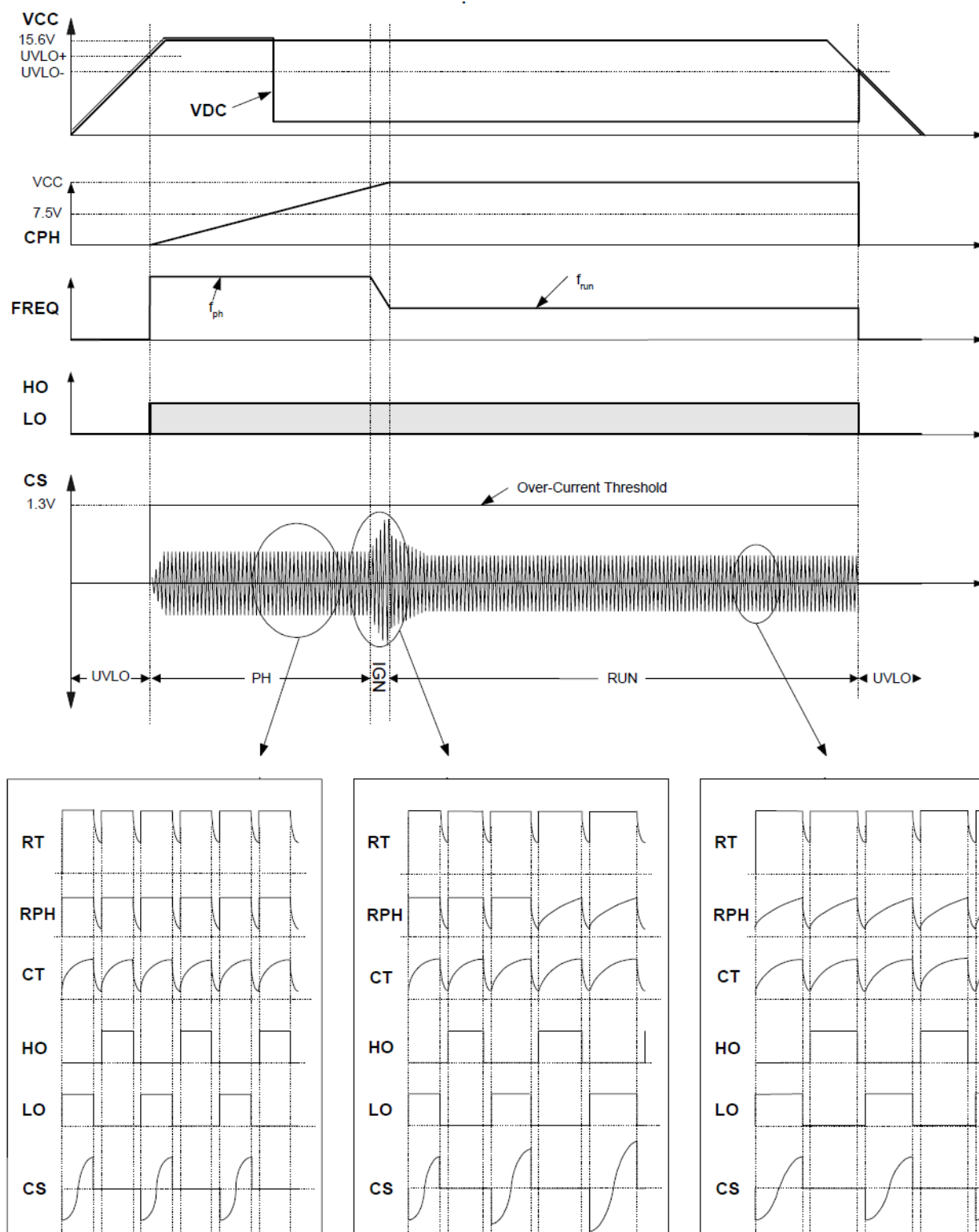


Рис.3.7 - Часові діаграми при нормальній роботі

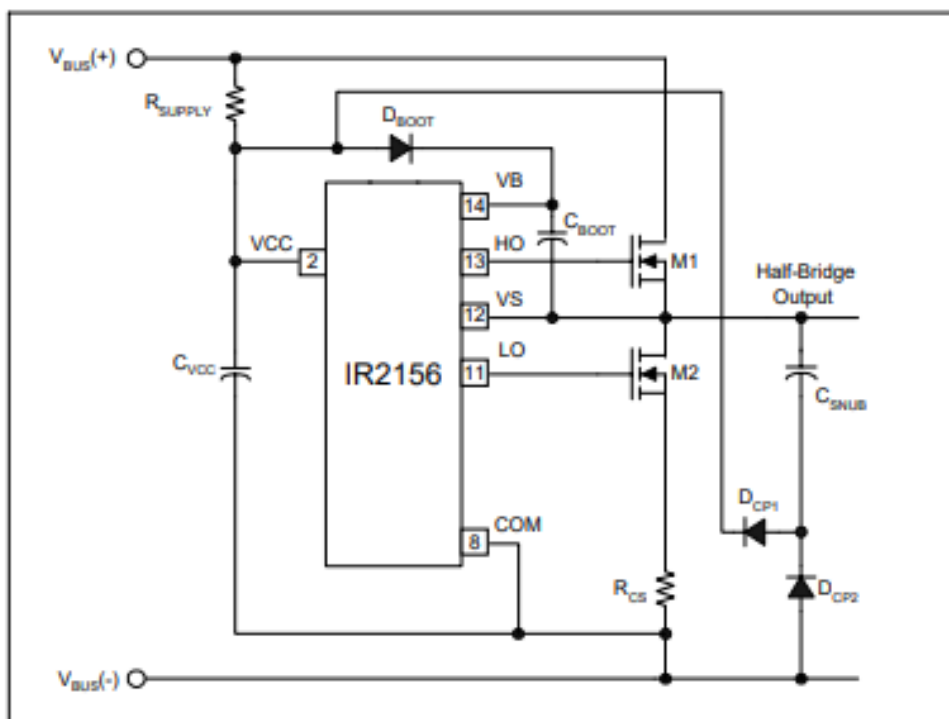


Рис.3.5 - Схема запуску і живлення

Пусковий конденсатор почнає заряджатись через резистор живлення. Як напруга конденсатора на VCC досягне порогової величини, та на SD буде нижче 4.5 В, мікросхема включається, HO та LO генерують коливальний сигнал. Починає розряджатися конденсатор через збільшення сили струму в ІМС (рис. 3.6).

В циклі розряду струм від зарядного насоса почнає заряджати конденсатор вище порогу відключення ІМС. Початкові конденсатор і демпферний конденсатор, такі щоб струм забезпечував живлення для навантаження при різних режимах роботи. Перший імпульс виходить від контакту LO. В режимі блокування виходи драйверів HO та LO не генерують сигнал, контакт СТ підключається до землі, COM, для вимкнення генерації сигналу, контакт CPH з'єднується до COM для онулення часу підігріву.

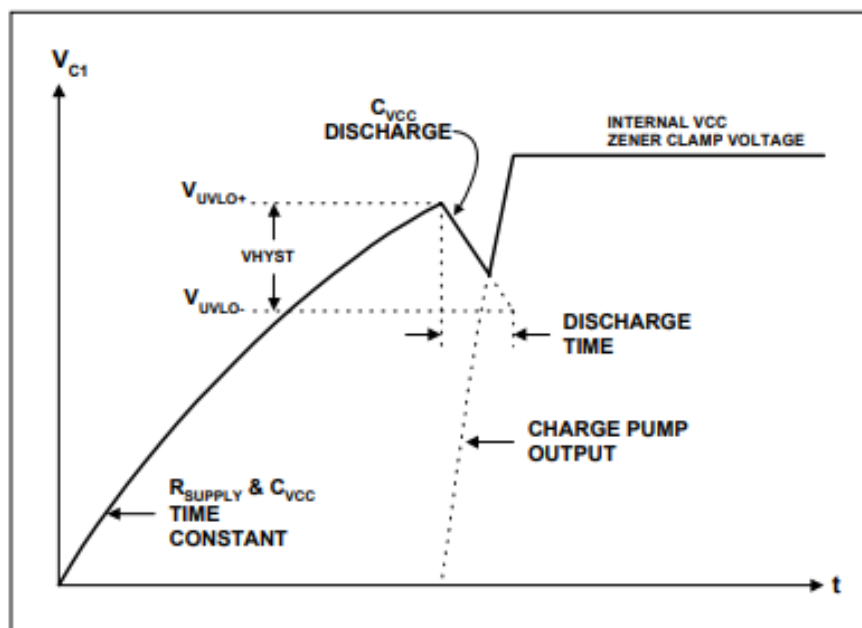


Рис.3.6 - Напруга живлення CVCC конденсатора.

Режим підігріву (РН) визначається як стан ІС, яке виконується при нагріванні нитки лампи до правильної температури випромінювання. IR2156 переходить в режим нагріву, коли VCC перевищує позитивний поріг UVLO. НО та LO починають генерувати коливання. Контакт СРН відключений від COM та має джерело струму (5 мкА) (рис. 3.8), який лінійно заряджає зовнішній нагрівальний конденсатор на контакті СРН. Частота нагріву це паралельна комбінація резисторів RT і RPH разом із конденсатором СТ. Заряди та розряди СТ між 1/3 та 3/5 VCC (див. діаграму, рис. 1.7). СТ експоненціально заряджається через комбінацію RT і RPH, підключених всередині до VCC через MOSFET S1 (можна побачити на блок-схемі). Час зарядки СТ від 1/3 до 3/5 VCC - це час включення відповідного драйвера затвора виходу НО або LO. Після того, як СТ перевищує 3/5 VCC, MOSFET S1 відключається, вимикаючи RT та RPH. Потім СТ експоненціально розряджається через внутрішній резистор RDT і польовий МОП – транзистор S3 на COM.

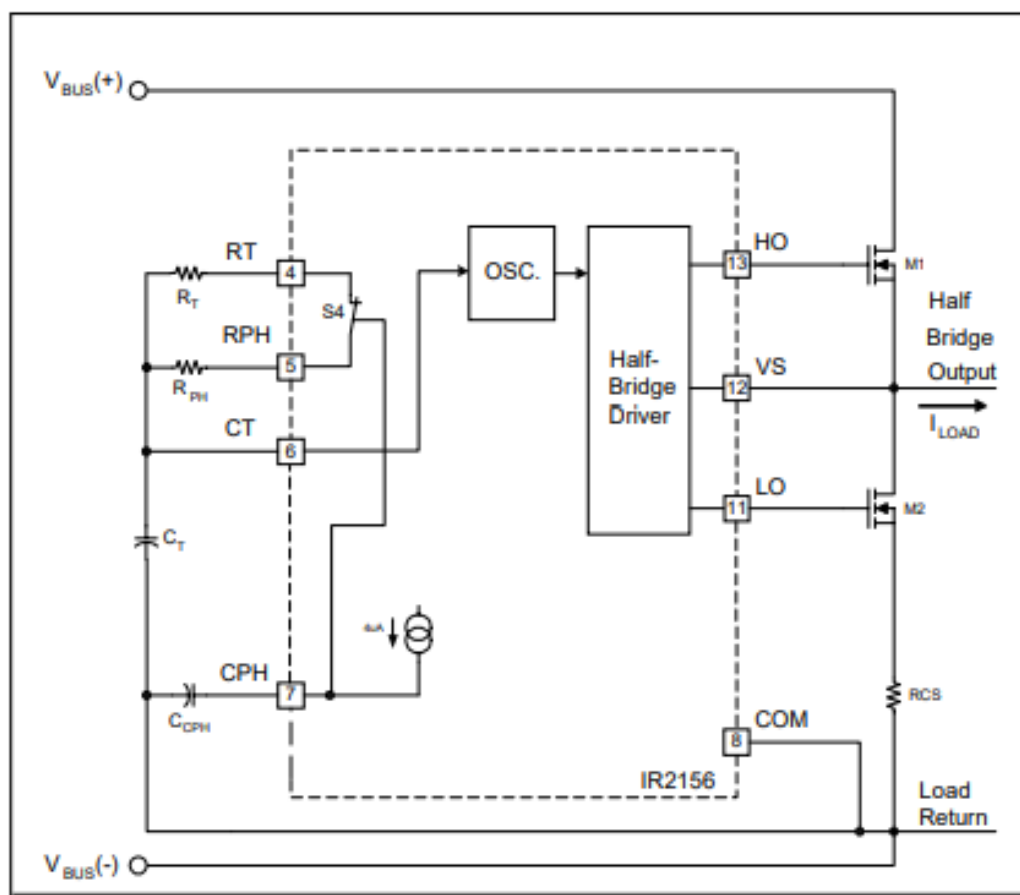


Рис. 3.8 - Схема попереднього нагріву

Час розряду C_T до $1/3 V_{CC}$ - це мертвий час (вимкнення генерації) драйверів HO та LO. Вибране значення C_T запрограмує мертвий час (див. "Рівняння дизайну" (1) та (2)). Транзистор S3 відключається, від'єднуючи RDT від COM, а транзистор S1 включається, ініціюючи повторне підключення RT і RPH до VCC.

Робоча частота залишається на частоті попереднього нагрівання, поки напруга на CPH не перевищить межу в 13 В, а ICM перейде в режим запалювання. Під час попереднього нагрівання захист від перевантаження та перенапруги шини постійного струму спрацьовує, коли напруга на контакті CPH перевищує 7,5 В.

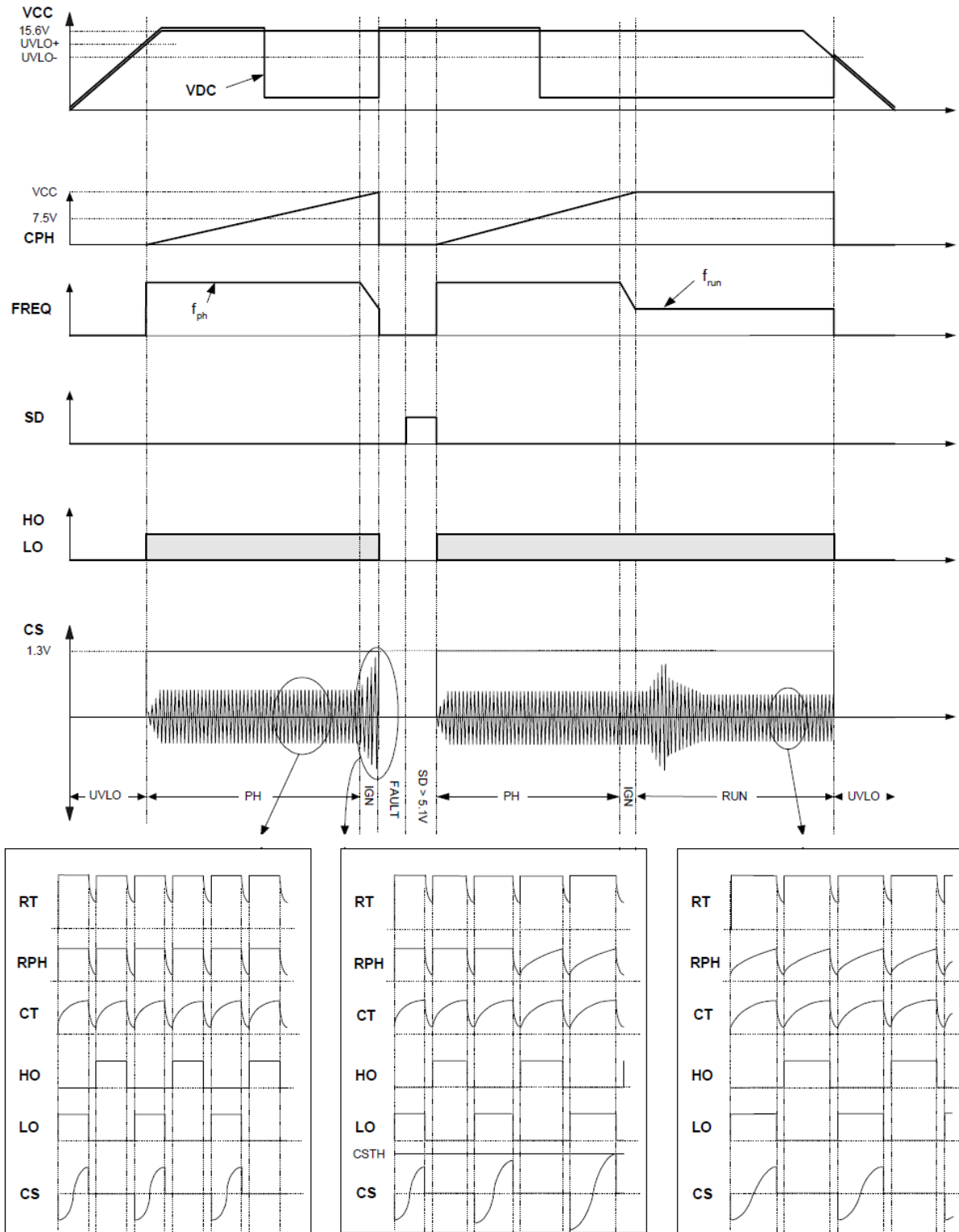


Рис. 3.10 - Часові діаграми (порушення стану)

Режим запалювання (IGN) визначається як стан СТ, при якому через лампу встановлюється висока напруга, потрібна для запалювання лампи. Мікросхема переходить в запалювання при напрузі на виводі СРН більше 13В. СРН внутрішньо підключений до затвора (рис. 3.9), а MOSFET (S4) підключає RPH до RT. Коли напруга на виводі СРН перевищує (13 В), напруга живлення до MOSFET S4 падає нижче порога включення. В результаті резистор RPH плавно від'єднується від RT, для плавного падіння від частоти нагрівання до кінцевої пускової частоти драйверів. Перевантаження порогового значення на CS захистить лампу внаслідок удару або поломки нитки розжарення. Напруга на CS визначається струмом MOSFET, що протікає через зовнішній резистор струму RCS. Тому резистор RCS програмує максимально допустимий струм запалювання і максимальну напругу запалювання вихідного каскаду баласту. Максимальний струм не повинен перевищувати грацію допустимих параметрів струму вихідного MOSFET. Якщо напруга перевищує 1,3 В, мікросхема переходить в режим несправності, сигнал на НО та LO відсутній.

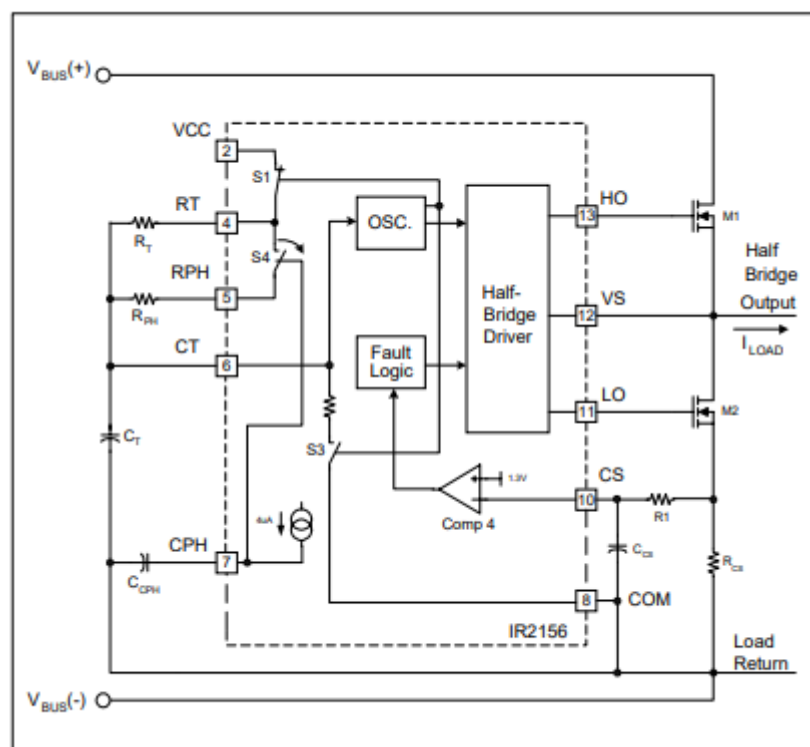


Рис. 3.9 - Схема запалювання

Режим виконання (RUN) коли лампа успішно запалюється, робоча генерація починає працювати. Режим виконання визначається станом, в якому знаходиться ІМС під час робочої частоти коливань, коли встановлена дуга лампи і лампа працює на заданому рівні потужності. Робоча частота коливань сигналу драйвера, визначається резистором R_T та синхронізацією конденсатора C_T (див. Дизайнерські рівняння, (3) і (4)). При пробі комірки або видаленню навантаження відбувається жорсткий перехід, напруга на струмочутливому резисторі R_{CS} перевищує внутрішній поріг в 1,3 В, тоді ІМС переходить у режим несправності. На контактах HO та LO генерація буде зупинена, сигнал відсутній.

Режим помилки (FAULT) при напрузі на вході контакту CS більше порогових 1,3 В, у будь-який момент після переходу в режим роботи ІМС переходить в режим несправності і обидва виходи генеруючих драйверів, HO та LO , блокуються та перестають генерувати сигнал. CPH розряджається в COM для скидання часу режиму нагрівання, а CT розряджається в COM для виключення генератора. Для виходу з режиму помилки, до VCC необхідно повторно подати сигнал нижче порога відхилення $UVLO$, або параметер контакту SD відключиння, потрібно підтягнути вище 5,1 В. Любий із них змусить ІМС перейти в режим $UVLO$ (рис. 3.10). Коли VCC перевищить напругу на порозі і SD стане нижче 4,5 В, ІМС знову почне генерувати коливання в попередньому режимі.

3.3 Дизайнерські рівняння

Опис та розрахунок параметрів компонентів для підключення на контакти мікросхеми, за для програмування робочої частоти та частоти розігріву, а також часу паузи генерації імпульсів. Дані можуть трохи відрізнятися від експериментальних, чезез особливості ІМС.

3.3.1 Програмування мертвого часу (dead-time)

Час затримки між імпульсами на контактах драйверів НО та LO програмується синхронізуючим конденсатором СТ та внутрішнім резистором RDT. Час затримки – це час за який конденсатор СТ розрядиться із 3/5 VCC до 1/3 VCC та розраховується як:

$$t_{DT} = C_T \cdot 2000 \quad (1)$$

$$C_T = \frac{t_{DT}}{2000} \quad (2)$$

3.3.2 Частота запуску програми

Остаточна частота запуску запрограмовується через синхронізуючий резистор RT та синхронізуючий конденсатор СТ. Час зарядження конденсатора СТ із 1/3 VCC до 3/5 VCC визначається часом подачі імпульса на виході НО або LO. Таким чином робоча частота визначається як:

$$f_{RUN} = \frac{1}{2 \cdot C_T (0.6 \cdot R_T + 2000)} \quad (3)$$

$$R_T = \frac{1}{1.12 \cdot C_T \cdot f_{RUN}} - 3333 \quad (4)$$

3.3.3 Частота програми попереднього нагріву

Програмування частоти підігріву здійснюється за допомогою резисторів R_T та R_{PH} , та синхронізуючим конденсатором C_T . Резистори з'єднуються паралельно внутрішньо у блок-схемі ІС, при роботі підігріву. Частота підігріву визначається як:

$$f_{PH} = \frac{1}{2 \cdot C_T \cdot \left(\frac{0.6 \cdot R_T \cdot R_{PH}}{R_T + R_{PH}} + 2000 \right)} \quad (5)$$

$$R_{PH} = \frac{\left(\frac{1}{1.12 \cdot C_T \cdot f_{PH}} - 3333 \right) \cdot R_T}{R_T - \left(\frac{1}{1.12 \cdot C_T \cdot f_{PH}} - 3333 \right)} \quad (6)$$

3.3.4 Програмування часу попереднього нагрівання

Час за який відбувається попередній нагрів визначається часом при якому конденсатор C_{PH} зможе зарядитися до 13 В, припускаючи що V_{CC} рівне 15 В. Джерело струму 4,3 мкА яке знаходиться внутрішньо виходить із контакту C_{PH} . Час попереднього розігріву програмується як:

$$t_{PH} = C_{PH} \cdot 3.02e6 \quad (7)$$

$$C_{PH} = t_{PH} \cdot 0.331e-6 \quad (8)$$

3.3.5 Програмування максимального струму запалювання

Струм при якому може працювати ІМС програмується зовнішнім резистором R_{CS} , має внутрішній поріг в 1.25 В. Поріг забезпечує границю величини струму навантаження, що може бути перевищена при збільшені частоти в напрямку резонансу колім лампа запалюється. Пороговий струм запалювання програмується як:

$$I_{IGN} = \frac{1.25}{R_{CS}} \quad (9)$$

$$R_{CS} = \frac{1.25}{I_{IGN}} \quad (10)$$

3.4 Діаграма стану

Можна спостерігати опис всіх режимів в яких може перебувати мікросхема IR2156 та взаємозв'язок між ними на рис. 3.11, границі при яких здобувається перехід від одного режиму до другого, все це зображається у схематичній діаграмі роботи ІМС.

Більш детальнішу роботу при кожному режимі і також перехід генератора від одного стану до іншого можна побачити на часових діаграмах роботи ІС на рис. 3.7 нормальна робота, перехід ІС в режим помилки, та відновлення робочого процесу дивитись на рис 3.10 порушення стану.

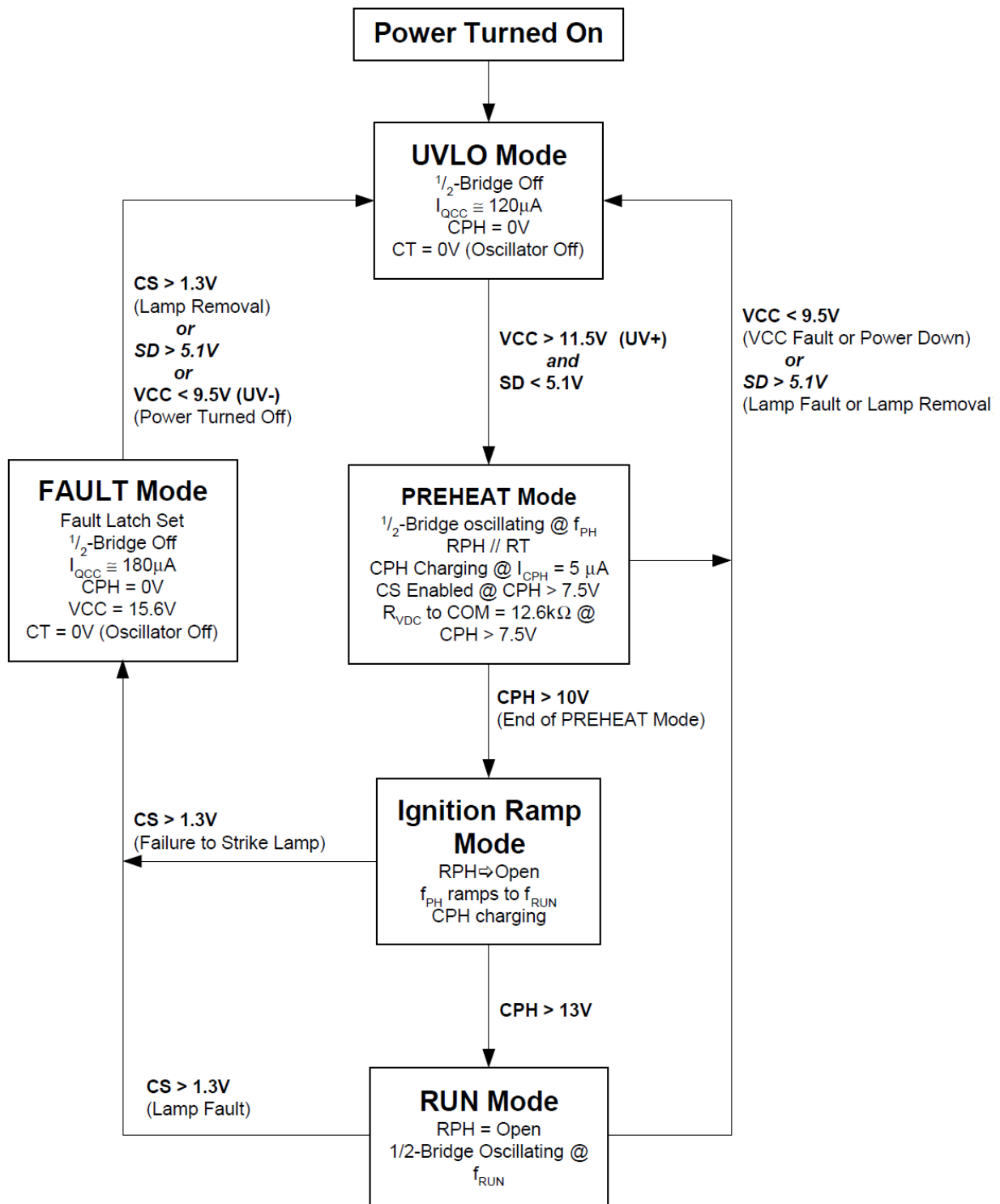


Рис. 3.11 - Діаграма стану

3.5 Осцилограма регулятора

Регулювання здійснюється за допомогою схеми на операційних підсилювачах. Реалізація полягає в тому, що коли потужність на інверторі стає дуже великою, не допустимою для нашої установки і може нашкодити системі, ОП починають генерувати сигнал більшої напруги, який починає надходити на конденсатор СТ тим самим проводити його заряд швидше, що впливає на збільшення частоти автогенератора. Коли потужність із збільшенням частоти зменшується в межі норми, генерація на ОП зупиняється. Осцилограма імпульсів напруги на конденсаторі СТ, та на виході операційного підсилювача при регулюванні робочою частотою показана на рис. 3.12.

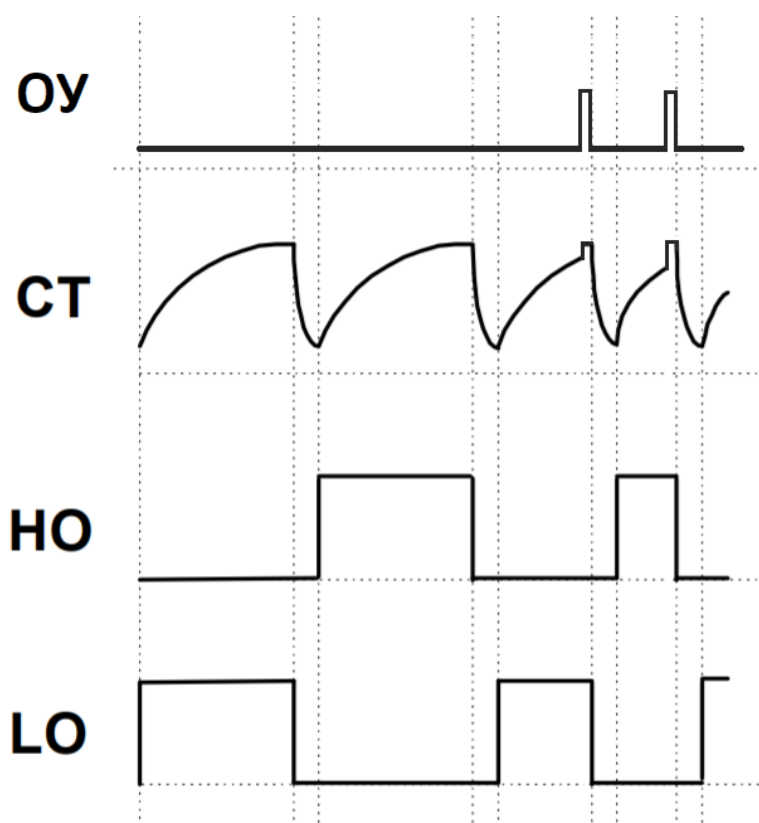


Рис. 3.12 - Осциллограма роботи конденсатора СТ та компаратора при регулюванні частоти

3.6 Принципова схема. Визначення значень параметрів основних компонентів

Ключовим елементом схеми (рис. 3.15) є резистори синхронізації RT, RPH та конденсатор СТ, вони відповідають за робочу частоту та мертвий час між імпульсами на інверторі, Конденсатор СРН відповідає за час роботи у режимі нагрівання. Програмування мікросхеми відбувається за рахунок номіналів компонентів, дизайнерські рівняння можна подивитись в цьому розділі.

Проведем розрахунок параметрів.

Індуктивність котушки індуктора рівна 1.9 мкГн, ємність конденсаторної батареї 1.4 мкФ, проведем розрахунок резонансну частоту системи:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{1.9 \cdot 1.4 \cdot 10^{-12}}} = 97580 \text{ Гц}$$

Розрахуємо час застою між імпульсами на драйвера НО і LO, нехай він буде 0.1 мкс, незначний час, він не буде заважати та впливати на роботу пристрою:

$$C_T = \frac{t_{DT}}{2000}$$

$$C_T = \frac{0.1 \cdot 10^{-6}}{2000} = 50 \text{ пФ}$$

Розрахована резонансна частота 97.6 кГц. Виберемо частоту роботи більшу не набагато, 100 кГц буде оптимально. Розрахуємо її:

$$RT = \frac{1}{1.12 \cdot CT \cdot f_{RUN}} - 3333$$

$$RT = \frac{10^{12}}{1.12 \cdot 50 \cdot 100000} - 3333 = 175238 \text{ Ом} \approx 175 \text{ кОм}$$

Так як режим розігріву драйвера для нас не важливий ми відключемо його, частотний резистор RPH використаємо такого ж номіналу що і робочий, тобто 180 кОм. Для відключення режиму виключимо конденсатор CPH із кола, тобто $t_{ph} = 0$, щоб не впливати на корисну роботу нашої установки:

$$C_{ph} = 0$$

При ручному виборі частоти автогенератора програмування здійснюється завдяки пониженому опору на вхід RT мікросхеми, який для цієї функції переоприділяється як опір паралельно з'єднаних RT0 і RT резисторів.

В даному режимі мінімальна частота буде рівна робочій 100 кГц, так як максимальний опір ніколи не перевищить опір резистора RT, завдяки паралельному з'єднанню компонентів.

Тепер виберемо максимальну частоту генерації. реалізована зміна виберемо робочу частоту трохи більшу, наприклад 100 кГц і розрахуємо її:

$$RT_{all} = \frac{RT \cdot RT0}{RT + RT0} = \frac{10^{12}}{1.12 \cdot 50 \cdot 10^6} - 3333 = 17857 \text{ Ом} \approx 25 \text{ кОм}$$

$$RT0 = \frac{RT \cdot RT_{all}}{RT - RT_{all}} = \frac{175 \cdot 25 \cdot 10^6}{175000 - 25000} = 29166 \approx 30 \text{ кОм}$$

Отже обрали змінний резистор із діапазоном опору від 0 до 30кОм.

Індуктор живитись від 4В які надходять від вторинних котушок трансформатора, їх має бути чотири штуки з'єднаних паралельно (рис. 3.13), на первину котушка надходить 300В та відбувається керування силовими транзисторами (рис. 3.14).

Подальше живлення мікросхеми IR2156, буде надходити від вторинної котушки трансформатора, проходячи через діодний міст і випрямляючи напругу до 15В (рис. 3.13).

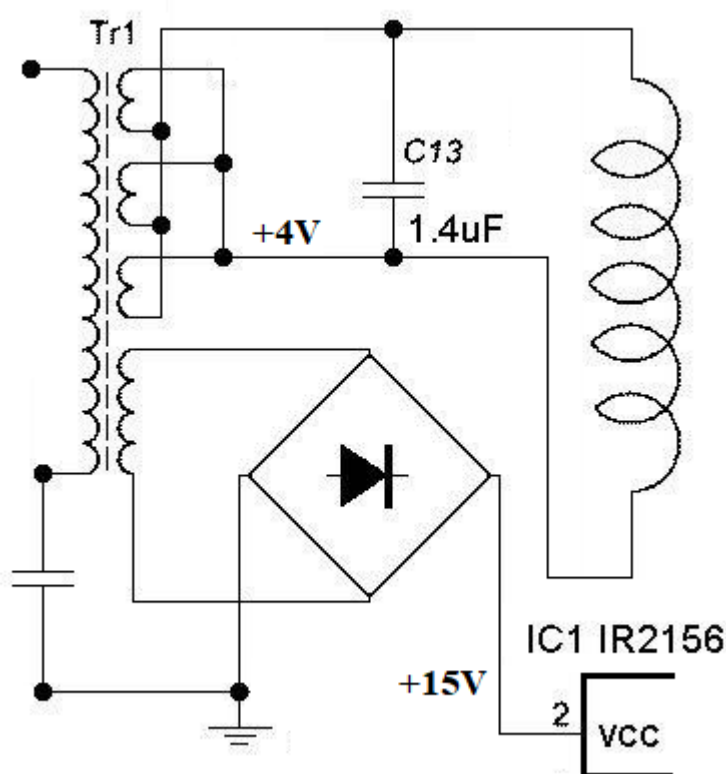


Рис. 3.13 - Трансформатор живлення індукційної печі та мікросхеми IR2156

Розрахуємо параметри трансформатора та його розміри. Будемо використовувати імпульсний трансформатор із феритовим сердечником, так як він найефективніший для струму на високих частотах.

У сучасній електроніці пониження напруги відбувається за допомогою високочастотних імпульсних перетворювачів, трансформатор перетворює напругу частотою в 10 - 100 кГц, це дозволяє зменшити розміри магнітопроводу що є

сердечником. У старих телевізорах трансформатори працювали на промисловій частоті 50 Гц, що викликає необхідність використовувати масивні багатокілограмові трансформатори.

Потужність трансформатора залежить від величини розмірів сердечника, та робочої частоти перетворення. Первинна обмотка трансформатора для пониження напруги завжди буде намотана більш тонким проводом, ніж обмотка вторинна. При зниженні напруги можливе збільшення струму у вторинній обмотці, потрібен провід більшої товщини.

Використаємо тороїдальний вид трансформатора (кільцевий), структура магнітопроводу зображена на (рис. 3.13).

Були розраховані оптимальні параметри габаритів трансформатора, та кількість витків на первинній та вторинній котушці.

Габарити магнітопровода:

- зовнішній діаметр – 135 мм,
- внутрішній діаметр – 130 мм,
- висота – 90 мм

При наших параметрах які мають жити та впливати на трансформатор:

- Напруга живлення – 300 В,
- Ефективна індукція магнітопровода – 0,03 Тл,
- Уфективна магнітна проникненість – 1000,
- Удільна потужність повних втрат в магнітопроводі – 270 Вт/кг,
- Робоча частота сигналу – 100 кГц

При таких вхідних конфігураціях на інверторі та вибраних розмірах магнітопроводу, ми можемо здобути бажану напругу та силу струму для подальшого живлення індуктора. Задамо характеристики котушок.

Розраховані параметри котушок трансформатора:

Первина котушка – містить 58 витків із діаметром 0,49 мм, струм який вона буде споживати в робочому режимі 15 А.

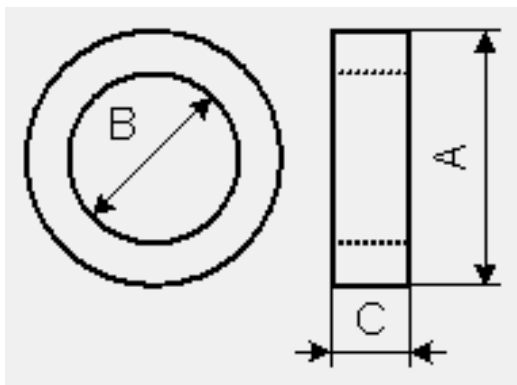
Вторина обмотка має чотири котушки однакового типу, для подальшого живлення індуктора, та ще одну для живлення мікросхем. Загалом вторина обмотка це 5 котушок.

Котушки для живлення пчі 4х – містять по 2 витки із діаметром 1,1 мм, виникаюча напруга 4 В із струмом 250 А.

Котушка для живлення мікросхем – містить 4 витки із діаметром 0,28 , на неї находить 11 В що згодом успішно випрямиться у 15 В для живлення систем керування.

При таких результатах на трансформаторі:

- амплітуда напруги складе 159 В, і амплітуда струму на первинній обмотці в 30 А.
- Потужність 4000 Вт.
- ККД трансформатора має бути 94.8 %, що не може не радувати.



A – зовнішній діаметр (первина котушки),
 B – внутрішній діаметр, вторина котушки,
 C – висота магнітопроводу

Рис. 3.15 - Магнітопровід тороїдального трансформатора

Живлення для операційних підсилювачів для їхньої коректної роботи (+5V) надходить від DC – DC перетворювача він в свою чергу живиться від діодного мосту на вторинній котушці трансформатора, напруга на мості зазначена в (+15V) він же також живить ІС.

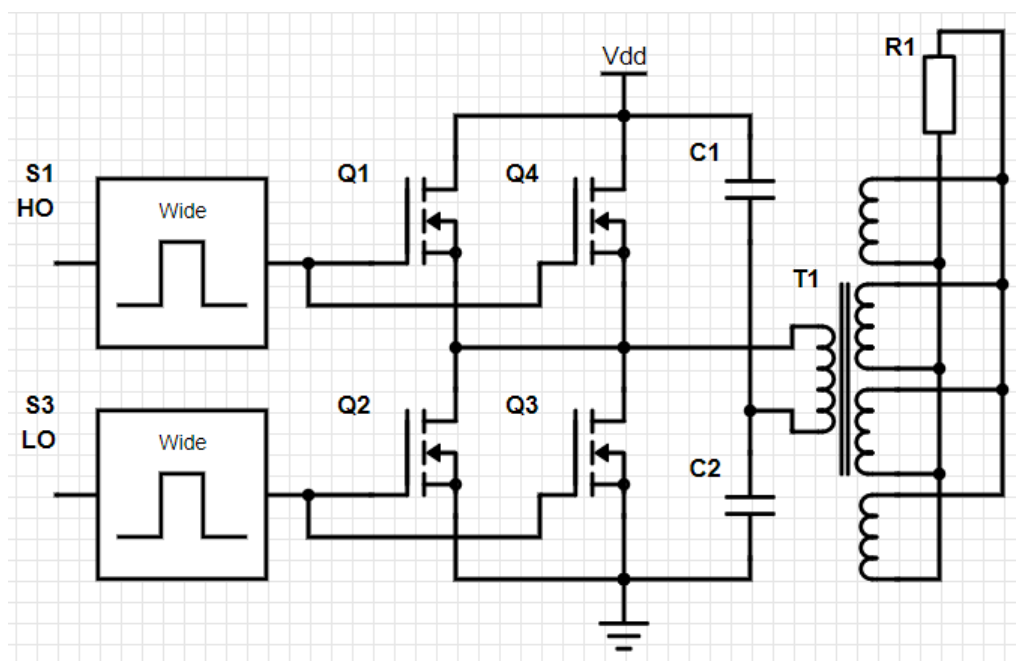


Рис. 3.14 - Інвертор на силових транзисторах

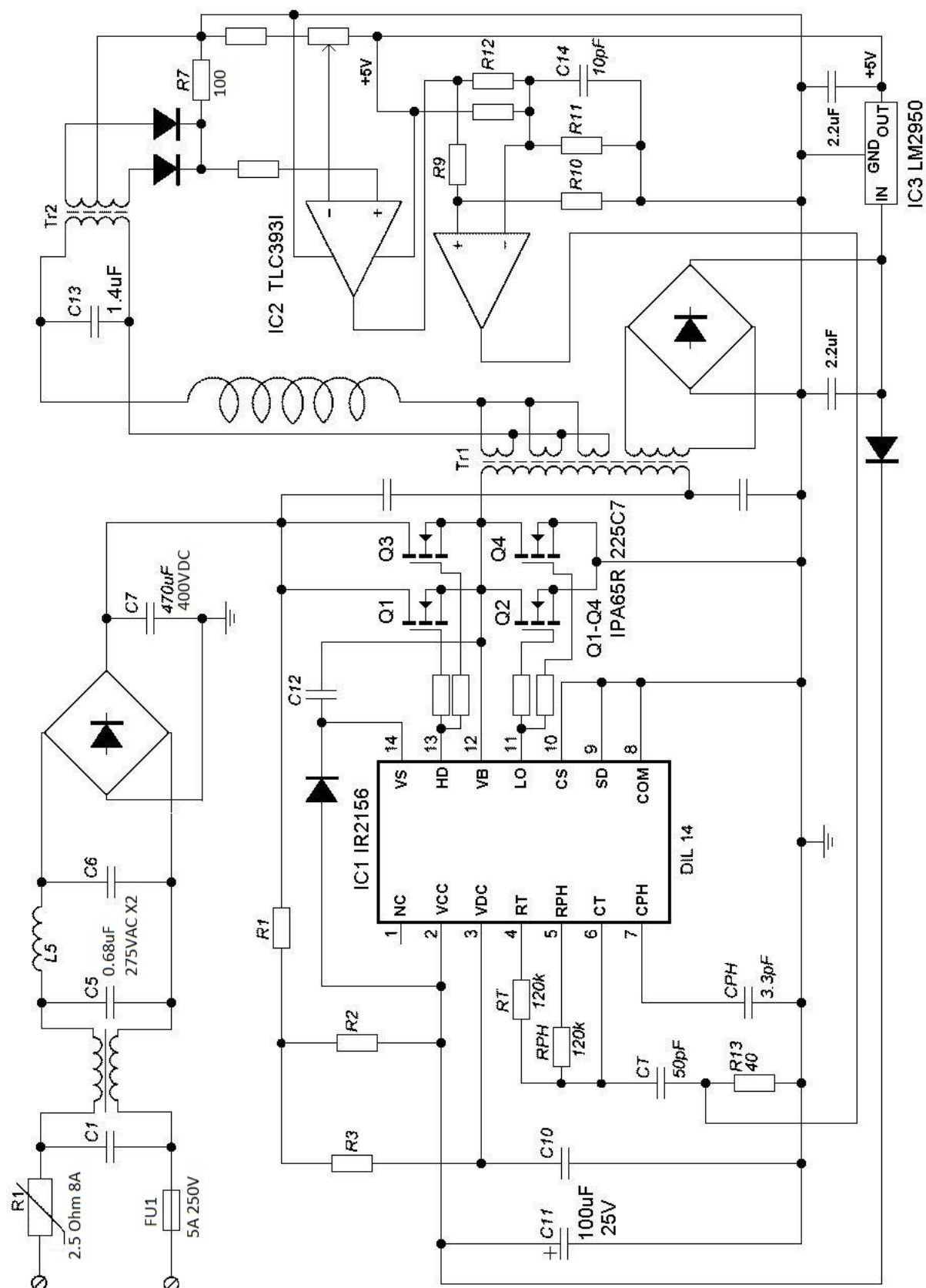


Рис 3.15 - Схема приладу індукційного розігріву

3.7 Висновки по розділу

В третьому розділі проаналізована роботу напівмістового драйвера, також детально розписана блок-схема і режими роботи даної драйверної інтегральної мікросхеми.

Була розрахована резонансна частота на конторі індуктора яка рівна 100кГц, також вибрані номінали компонентів за допомогою яких програмується мікросхема, саме RT (робоча частота генерації), СТ (мертвий час), також обрали RT0 (максимальна робоча частота генерації яку може задати користувач), вибрано 1 МГц.

Вибраний методи живлення ІМС та ОУ, живлення здійснюється трансформатором через діодний міст.

Вибрана напруга 4В на якій буде працювати наша індукційна піч, реалізований метод керування перестройкою по частоті трансформатора через інвертор на чотирьох силових МОП - транзисторах.

Вибраний імпульсивний трансформатор.

Вираховані параметри габаритів, кількості витків на обмотках та потужності трансформатора які ми потребуємо для живлення індуктора та схеми.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Стартап - вид малого венчурного підприємництва, фактично являє собою бізнес-ідею, що заснована на інновації або інноваційній технології. Ця ідея ще не використовується на ринку або компанія, що хоче вийти на ринок з цією ідеєю має новий погляд щодо її реалізації, що має суттєві переваги над існуючими.

У цьому розділі буде проведено розробку стартап-проекту на тему дисертації, а саме пошук найбільш ефективного способу використання результатів дисертації в ринкових умовах. Буде проведений маркетинговий аналіз стартап-проекту, що складається з: відбору ідей, побудови концепції продукту/послуги, визначення перспектив ринкової реалізації продукту та розроблення маркетингової стратегії.

4.1 Опис ідеї проекту

В межах підпункту послідовно проаналізовано та подано у вигляді таблиць:

- 1) зміст ідеї;
- 2) можливі напрямки застосування;
- 3) основні вигоди, що може отримати користувач товару (за кожним напрямком застосування);
- 4) чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників;

Перші три пункти подано у вигляді таблиці (табл. 4.1) і дають цілісне уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 4.1 - Опис ідеї проекту.

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигода для користувача
<p>Ідея проекту розробити конструкцію, Резонанс Індукційного нагрівача, для можливості використання у великому спектрі послуг.</p> <p>Із кращими характеристиками, та простим інтерфейсом керування.</p>	<p>Побутові пристрої нагрівання, на основі індукційного нагріву.</p> <p>Продаж та встановлення, індукційних нагрівачів, схем живлення.</p>	Кращі характеристики компонентів, та простота у використанні.
	<p>Співпраця та договір із підприємством по виробленню нагрівачів систем, використовуючи електроенергію для живлення своїх пристроїв.</p> <p>Таких як електричні кухоні плити, нагрівачі води.</p>	Економічність, іноваційність у технологіях, для компанії партнера. Реклама та привязка до бренду наших продуктів.
	Продаж технологій та нагрівачів різних конструкцій, характеристик, компаніям по ремонту, встановленню систем побутової техніки, в домах, офісах, підприємствах.	Економічність, простота, та дешевизна, як для них, так і для нас.

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї (чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників) порівняно із пропозиціями конкурентів передбачає:

- 1) визначення переліку техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї.
- 2) визначення попереднього кола конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводиться збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;
- 3) проводиться порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначаються показники, що мають
 - а) гірші значення (W, слабкі);
 - б) аналогічні (N, нейтральні) значення;
 - в) кращі значення (S, сильні) (табл. 2).

Таблиця 4.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту.

№ п / п	Техніко- економічні характерис- тики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W	N	S
		Мій проект	HURAKAN	Steba IK	BOSCH	слаб ка стор она	нейт раль на стор она	силь на стор она
1	Час розігріву	2 - 60 с	5 - 100 с	15 - 120 с	2 - 60 с			+

2	Максимальна потужність	0,2 - 10 кВт	8 кВт	0,4 - 2 кВт	0,2-0,6 кВт			+
3	Робоча частота	20 – 90 (100) кГц	50 – 100 кГц	30 – 60 кГц	40 – 90 кГц			+
4	Робочі температури	50 - 900 °С	60 - 500 °С	60 - 240 °С	40 - 120 °С			+
5	Схема керування	Ручне, авто. Робота на максимальних потужностях.	Авто та ручне керування, здійснюється компютером.	Керування ручне, датчик температури.	Керування тільки автомат, здійснюється віддаленим компютером.		+	
6	ККД	85 – 90 %	80 – 85 %	80 – 90 %	90 – 95 %		+	
7	Економічна	Дешевий, економічний	Дорогий	Помірна ціна	Дуже дорогий, економічний			+
8	Безпека	Безпечно	Безпечно	Безпечно	Безпечно		+	

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу необхідно провести аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару).

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 3):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/добробити?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

Таблиця 1 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Схема керування частотою	Використання IC IR2152 для керування перестройкою по частоті.	Наявна	Доступна
2	Генерація коливань на інверторі.	Використаємо декілька пар силових МОП-транзисторів, керованих вихідним сигналом на чіпі.	Наявна	Доступна
3	Мала напруга, та	Використаємо багато паралельно	Наявна	Доступна

	великий струм на інверторі.	з'єднаних вторинних котушок на інверторі, для максимального струму.		
4	Система керування потужністю.	Керування оптимальної потужності, здійснюється парою (ОП), регулювання частотою в межах Резонансу.	Наявна	Доступна
5	Корпус	Друк із металу за допомогою 3D принтера з подальшою обробкою.	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: резонансний інвертор для управління частотою на індукційній котушці.				

За результатами аналізу таблиці робиться висновок щодо можливості технологічної реалізації проекту: так чи ні, а також технологічного шляху, яким це доцільно зробити (з поміж названих технологій обираються такі, що доступні авторам проекту та є наявними на ринку).

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартапу

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 4).

Таблиця 2 - Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту.

№ п/ п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	12
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	40 000 000 ум. од.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Інвестиції, маркетингове управління компанії.
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Необхідна сертифікація
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	≈ 90%

Середня норма рентабельності в галузі 90%. Результати аналізу таблиці робимо висновок що ринок є привабливим для входження за попереднім оцінюванням.

Надалі визначаються потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5).

Таблиця 3 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту.

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Комфорт, швидкість у використуванні, надійність.	Орієнтація на ринок побутової техніки.	Корпоративні клієнти.	Висока надійність, час роботи та низька ціна продукту.

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. №№ 6-7). Фактори в таблиці подавати в порядку зменшення значущості.

Таблиця 4 - Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Потреба в ресурсах	Потрібне технічне забезпечення	Інвестиційне фінансування.
2	Конкуренція	Ринок є новим та насиченим технологіями, на ньому є дуже багато	Вдосконалення технології для зниження ціни

		гравців які мають в даній області вже непогані успіхи і хороше фінансування.	кінцевого продукту, а також підняття якості обслуговування.
--	--	------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------

Таблиця 5 - Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Перехід до іншої галузі використання.	Доопрацювання конструкції системи керування частотою для можливості більш детального контролю для застосування в інших галузях.	Удосконалення конструкції керування, перехід на мікро-процесорне управління, зміна технології виготовлення.
2	Попит.	Напрацювання попиту шляхом розширення асортименту та зниження ціни.	Удосконалення технології виробництва для розширення продукції та здешевлення.

Надалі проводиться аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл. 8).

Таблиця 6 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - олігополія.	На ринку присутня не велика кількість фірм серед яких є лідери.	Маркетинг, підвищення експлуатаційних характеристик товару, зниження ціни.
2. За рівнем конкурентної боротьби - національний	Постачальники послуг конкурують на світовому ринку на міжнародному рівні.	Налаштування експорту товару.
3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Товар призначений для певної конкретної галузі та потребує конструктивних змін для використання в інших галузях.	Розробка нових конструкцій для виходу на інші галузі, доопрацювання конструкції для покращення надійності.
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-родова	Конкуренція між товарами, які виконують одну функцію, але мають різну конструкцію.	Покращення характеристик приладу.
5. За характером конкурентних переваг - цінова	Ціна товару нижча ніж у конкурентів.	Удосконалення конструкції задля зменшення ціни готового продукту.
6. За інтенсивністю - не марочна	Не марочна.	Неважливо якій компанії належить товар.

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера, додаток А) (табл. 9).

Таблиця 7 - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	HURAKAN, Bosch	-	Товар продається виробниками	Вимога до надійності	Немає
Висновки	Інтенсивність висока бо конкуренти мають напрацьовану базу клієнтів а також добру репутацію, а також товар є складним у виготовленні.	-	Постачальники не диктують умови на ринку.	Надійність продукту, низька ціна.	Обмеження відсутні.

За результатами аналізу таблиці робиться висновок щодо принципової можливості роботи на ринку з огляду на конкурентну ситуацію. Також робиться висновок щодо характеристик (сильних сторін), які повинен мати проект, щоб бути конкурентоспроможним на ринку. Другий висновок враховується при формулюванні переліку факторів конкурентоспроможності.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в (табл. 9), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 2), вимог споживачів до товару (табл. 5) та факторів маркетингового середовища (табл. №№ 6-7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлюється за табл. 10

Таблиця 8 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Економічний	Пропозиція нижчої ціни у порівнянні з конкурентами
2.	Масовість	Можливість у високих темпах виробництва для вчасних та великих відправлень товару.
3.	Якість та надійність	Надійність товару на рівні конкурентів при нижчій ціні.
4.	Технологічна простота виробництва	Технологічні процеси що використовуються для виробництва не є складними та не потребують висококваліфікованих кадрів.

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 11).

Таблиця 9 - Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Резонанс Індукційного нагрівача»

№ п/ п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Ціна	18			-				
2	Масовість та терміни	15							+
3	Робочі характеристики	19		-					
4	Надійність	15					+		

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 11).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза).

Таблиця 10 - SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Низька ціна товару, відносно швидкий темп виробництва, хороші характеристики.	Слабкі сторони: інтерфейс управління системою для користувача, у порівнянні із іншими.
Можливості: підвищення якості та надійності товару, розробка нових видів нагрівачів.	Загрози: значний наплив конкурентів у галузь, що може призвести до здешевлення товару.

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок (див. табл. 9, аналіз потенційних конкурентів).

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 13).

Таблиця 11 - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Розробка пристроїв з найнижчою ціною з жертвою надійності та довговічності.	70 %	1 – 3 роки
2.	Розробка нових типів нагрівачів та удосконалення системи управління для переходу в інші галузі.	55%	2 – 3 роки

Після аналізу зазначити обрану альтернативу.

З означених альтернатив обирається та, для якої:

Отримання ресурсів є більш простим та ймовірним.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 14).

Таблиця 12 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Корпоративні клієнти (компанії, що займаються виготовленням електричних пристроїв та компонентів для нагрівання)	Готові	Високий	Висока	Середня
Які цільові групи обрано: номер 1					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів (сегментів) автори ідеї обирають цільові групи, для яких вони пропонуватимуть свій товар, та визначають стратегію охоплення ринку:

- якщо компанія зосереджується на одному сегменті – вона обирає стратегію концентрованого маркетингу;
- якщо працює із кількома сегментами, розробляючи для них окремо програми ринкового впливу – вона використовує стратегію диференційованого маркетингу;

- якщо компанія працює із всім ринком, пропонуючи стандартизовану програму (включно із характеристиками товару/послуги) – вона використовує масовий маркетинг.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 15).

Таблиця 13 - Визначення базової стратегії розвитку

№ п/ п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку *
1.	Розробка конструкції орієнтованої на низький ціновий діапазон.	Підвищення технологічності виробу для зменшення собівартості.	Досягнення значної цінової переваги у порівнянні із конкурентами.	Стратегія лідерства на витратах.

* – Обрано стратегію лідерства на витратах.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 16).

Таблиця 14 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п / п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентно ї поведінки*
------------------	----------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------

1.	Ні	Забирати існуючих клієнтів	Ні	Заняття конкурентної ніші
----	----	----------------------------	----	---------------------------

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (див. табл. 5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 15) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 16) розробляється стратегія позиціонування (табл. 17). що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торговельну марку/проект.

Таблиця 15 - Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Ціна	Стратегія лідерства на витратах.	Низька ціна.	Низька ціна та достатні експлуатаційні характеристики.
2.	Надійність	Стратегія лідерства на Витратах.	Достатня надійність.	
3.	Якість	Стратегія лідерства на витратах.	Висока якість.	Висока якість товару при низькій ціні.

Результатом виконання підрозділу має стати узгоджена система рішень щодо ринкової поведінки стартап-компанії, яка визначатиме напрями роботи стартап-компанії на ринку.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 18 потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 16 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Низька ціна	Найнижча ціна на ринку.	Найнижча ціна на ринку.
2.	Висока якість	Висока якість.	Достатня якість у співвідношенні ціна - Якість.
3.	Простота у використанні	Простота у використанні порівняна з конкурентами.	Простота у використанні яка не поступається конкурентній.

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточнюється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 19). Орієнтовний перелік можливих характеристик товару наведено у додатку С.

Таблиця 17 - Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Опис базової потреби споживача, яку задовольняє товар (згідно концепції), її основної функціональної вигоди		
II. Товар у	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор

реальному виконанні	1) Діапазон робочих температур	М	Вр
	2) Довговічність	Нм	Тх
	3) Простота у використанні	М	Вр
	Якість: відповідає стандартам.		
	Пакування: захисний корпус.		
	Марка: бренд поки що відсутній.		
ІІІ. Товар із підкріпленням	До продажу: договір, гарантія.		
	Після продажу: доставка, утримання темпу виробництва, підтримка.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: ноу-хау.			

Після формування маркетингової моделі товару слід особливо відмітити – чим саме проект буде захищено від копіювання. Захист може бути організовано за рахунок захисту ідеї товару (захист інтелектуальної власності), або ноу-хау, чи комплексне поєднання властивостей і характеристик, закладене на другому та третьому рівнях товару.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 20). Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 18 - Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	400 - 1200\$	150 - 400\$	Більше 1100\$	100 - 500\$

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 21):

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця 19 - Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Найвищі експлуатаційні характеристики за помірну ціну.	Налагодження контакту з клієнтами шляхом підтримки та чесності у відносинах.	Канал другого рівня.	Виробник збуває продукцію напряму.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 22).

Таблиця 20 - Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
-------	---------------------------------------	--------------------------------------------------------	--------------------------------------------	----------------------------------	--------------------------------

1.	Вибір найкращого продукту за найнижчу ціну, масова закупівля.	Прямі канали комунікації.	Ціна, якість надійність.	Надання інформації про переваги пристрою.	Низька ціна та достатня надійність.
----	---------------------------------------------------------------	---------------------------	--------------------------	-------------------------------------------	-------------------------------------

Результатом пункту 5 має стати ринкова (маркетингова) програма, що включає в себе концепції товару, збуту, просування та попередній аналіз можливостей ціноутворення, спирається на цінності та потреби потенційних клієнтів, конкурентні переваги ідеї, стан та динаміку ринкового середовища, в межах якого буде впроваджено проект, та відповідну обрану альтернативу ринкової поведінки.

4.6 Висновки по розділу

Оскільки на ринку не має актуальних аналогів запропонованої моделі можна сказати, що при правильній стратегії впровадження і знаходженні виконавчої сили, проект швидко знайме свою унікальну нішу у сфері побутової електроніки.

Галузь індукційного нагріву завжди буде актуальною, і неспинно набираючою актуальність, так як перспективи і економічна вигода в цій галузі очевидна.

Сильною стороною стартапу є запропонована технологія реалізації управління на операційних підсилювачах, що дозволить мінімізувати реалізацію схеми.

На данному етапі представлена лише модель не перевірена практикою, тому перед пошуком інвесторів треба розробити експериментальні пробники та провести відповідні тестування всіх характеристик.

ВИСНОВКИ

Аналіз індукційних печей показав, що метод індукційного плавлення є сильно чутливим до струмів на резонансних частотах, що призводить до зменшення експлуатації приладів та не сприяє безпеці людей при їх використанні. Тому, важливим завданням є розробка інноваційних методів захисту від резонансних перевантажень, що забезпечує поширення індукційного нагріву як в побуті так і у промисловості.

Як об'єкт дослідження було вибрано піч індукційного нагріву із тигельним нагріванням так як піч працює на високих частотах, а також індуктор вибраний із великого діаметра та пустотою в середині при тому що робота на високих частотах призводить до появи скін-ефекту, та зменшення ціни індуктора.

Було розроблено алгоритм безпечного входу в робочий режим резонансного інвертора для живлення індукційної печі на основі драйвера IR2156.

Розраховано значення резонансної частоти індуктора печі - 97кГц, (розігрів матеріалів буде проводитись на частотах трохи вищих за 100кГц).

При дослідженні блок схеми IR2156 встановлено, за допомогою номіналів компонентів при зміні їх, можна застосувати схему управління інвертором індукційної печі, за використання метод частотного регулювання, який полягає в управлінні потужністю індукційної печі на основі керування робочою частотою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лозинский М. Г. Промышленное применение индукционного нагрева. / Лозинский М. Г. — М.: Изд-во АН СССР, 1948. — 471 с.
2. Бабат Г. И., Свенчанский А. Д. Электрические промышленные печи. / Бабат Г. И., Свенчанский А. Д. — М.: Госэнергоиздат, 1948. — 332 с.
3. Бурак Я. И., Огирко И. В. Оптимальный нагрев цилиндрической оболочки с зависящими от температуры характеристиками материала / Бурак Я. И., Огирко И. В. // Мат. методы и физ.-мех. поля. — 1977. — Вып. 5. — С. 26-30.
4. Васильев А. С. Ламповые генераторы для высокочастотного нагрева. / Васильев А. С. — Л.: Машиностроение, 1990. — 80 с. — (Библиотечка высокочастотника-термиста; Вып. 15). — 5300 экз. — ISBN 5-217-00923-3.
5. Применение токов высокой частоты в электротермии / Под ред. А. Е. Слухоцкого. — Л.: Машиностроение, 1968. — 340 с.
6. Фогель А. А. Индукционный метод удержания жидких металлов во взвешенном состоянии / Под ред. А. Н. Шамова. — 2-е изд., испр. — Л.: Машиностроение, 1989. — 79 с. — (Библиотечка высокочастотника-термиста; Вып. 11). — 2950 экз.
7. Акулин А. Моделирование и расширенный анализ схем в PSpice 2017. / Акулин А. — Электроника: НТБ, №10, 2017.
8. Аркадьев В. К. Электромагнитные процессы в металлах. Ч. 2. Электромагнитное поле. / Аркадьев В. К. - М. —Л., ОНТИ, 1936. 304 с.
9. Бабат Г. И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. / Бабат Г. И. - М.—Л., «Энергия», 1965. 552 с. 15.
10. Богданов В. Н. Высокочастотная сварка металлов. [Библиотечка высокочастотника термиста, вып. 11] / Богданов В. Н. - М.—Л., «Машиностроение», 1965. 66 с.

11. Слухоцкий А. Е. Индукторы. / Слухоцкий А. Е. — Л.: Машиностроение, 1989. — 69 с. — (Библиотечка высокочастотника-термиста; Вып. 12). — 10 000 экз. — ISBN 5-217-00571-8.
12. Интегральная схема управления балластом — Режим доступа до ресурсу : <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/ic/IR/control/ballast/IR2156.htm>
13. Полумостовой импульсный стабилизированный преобразователь напряжения, источник питания. Преимущества, недостатки, применение. Принцип работы. Примеры схем. Расчет. — Режим доступа до ресурсу : <https://gyrator.ru/power-polumostovoi>
14. Индукционная печь своими руками: принцип действия, конструкции и параметры, использование для обогрева. — Режим доступа до ресурсу : <https://microklimat.pro/otopitelnoe-oborudovanie/pechi/indukcionnaya-svoimi-rukami.html>
15. Основные типы регуляторов - Системы электроприводов исполнительных механизмов буровых установок. — Режим доступа до ресурсу : <http://leg.co.ua/knigi/oborudovanie/sistemy-elektroprivodov-ispolnitelnyh-mehanizmov-burovyh-ustanovok-3.html>
16. Индукционный нагрев - применение в промышленности. — Режим доступа до ресурсу : <https://xn--h1afsf5c.xn--p1ai/>
17. Преимущества плавки металлов в индукционных печах. — Режим доступа до ресурсу : <http://www.tdm.ru/promyshlennaya-bezopasnost/prjeimushhjestva-plavki-mjetallov-v-indukcionnykh-pjechakh>
18. BALLAST CONTROL IC. — Режим доступа до ресурсу : <https://www.chipfind.ru/datasheet/pdf/irf/ir2156.pdf>
19. Ballast Control, Programmable Preheat Time and Run Frequency, Programmable Deadtime in a 14-pin DIP package. — Режим доступа до ресурсу : http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/I/R/2/1/IR2156.shtml